

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE DE LA CONSTRUCTION
M. Sc. A

PAR
Souleimane EL MANSOURI

MISE AU POINT DU RHÉOMÈTRE À CISAILLEMENT ANNULAIRE POUR L'ÉTUDE
DE RHÉOLOGIE D'UN MASTIC BITUMINEUX AVEC VERRE INCORPORÉ

MONTREAL, LE 19 JANVIER 2016

©Tous droits réservés, Souleimane El mansouri, 2016

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

PRÉSENTATION DU JURY
CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Michel Vaillancourt, directeur de mémoire
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Daniel Perraton, codirecteur de mémoire
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

Mme. Nicole Demarquette, président du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Sébastien Lamothe, examinateur externe
Professionnel de recherche

M. Nam Nguyen, examinateur externe
Chargé de projet chez Groupe Qualitas inc

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 14 DÉCEMBRE 2015

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je tiens à remercier mes parents Abdellah et Fethia pour leurs encouragements, pour leurs supports et surtout pour l'éducation qu'ils m'ont donnée durant toutes mes années d'études. Cette maîtrise m'a demandé beaucoup d'efforts, mais grâce à vous, j'y suis parvenu et je vous en suis extrêmement reconnaissant. Ma plus grande reconnaissance à ma sœur Fatima-Ezzahra et mon frère Omar pour leurs conseils et leur patience illimitée. C'est grâce à vous que j'ai pu devenir ce que je suis aujourd'hui.

Nombreuses sont les personnes qui devraient être remerciées en reconnaissance du rôle qu'elles ont joué pour la réussite de ce projet :

J'adresse mes plus grands remerciements à mon directeur de mémoire Pr. Michel VAILLANCOURT pour son encadrement, sa disponibilité, son soutien financier et surtout moral tout au long de mon projet. Je le remercie également de m'avoir engagé à titre de chargé des travaux pratiques et chargé de laboratoire. C'est grâce à vous que j'ai pu réaliser ce rêve. J'espère avoir été à la hauteur de vos attentes.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance à mon codirecteur de mémoire Pr. Daniel PERRATON qui s'est impliqué dans mon travail sans limites et qui a fait preuve de beaucoup de générosité et d'engagement professionnel. Grâce à vous, j'ai su développer mes aptitudes dans la recherche et dans les matériaux bitumineux.

Je remercie aussi le Pr. Nicole DEMARQUETTE pour l'honneur qu'elle me fait en présidant le jury de ma soutenance.

Je tiens à remercier M. Sébastien LAMOTHE et M. Nam NGUYEN qui ont accepté la charge d'être examinateurs de mon travail. Je ferais mon maximum afin d'honorer leurs remarques et recommandations.

VI

Un remerciement spécial à M. Francis BILODEAU, M. Sylvain BIBEAU et M John LESCELLEUR techniciens responsables au LCMB, pour leur aide et leurs précieux conseils au sein du laboratoire, c'est grâce à votre expérience pertinente que les essais ont été réalisés dans de très bonnes conditions. Merci pour tous les bons moments passés en votre compagnie au laboratoire.

Je remercie aussi mes collègues au bureau A1500 et toute l'équipe du LCMB de m'avoir accueilli dans leur famille et de m'avoir apporté leur soutien. Enfin, j'adresse mes vifs remerciements au corps professoral et administratif de l'ÉTS pour ces deux années d'enseignement de qualité.

MISE AU POINT DU RHÉOMÈTRE À CISAILLEMENT ANNULAIRE POUR L'ÉTUDE DE RHÉOLOGIE D'UN MASTIC BITUMINEUX AVEC VERRE INCORPORÉ

Souleimane EL MANSOURI

RÉSUMÉ

Dans le domaine viscoélastique linéaire (VEL, domaine des petites déformations), le comportement thermomécanique du bitume et du mastic bitumineux (mélange uniforme de bitume et de fillers) a été caractérisé au Laboratoire des Chaussées et Matériaux Bitumineux (LCMB) de l'École de technologie supérieure (ÉTS) avec l'appui de nos partenaires externes : la Société des Alcools du Québec (SAQ) et Éco Entreprises Québec (ÉEQ).

Les propriétés rhéologiques des bitumes et des mastics ont été mesurées grâce à un nouvel outil d'investigation appelé, Rhéomètre à Cisaillement Annulaire (RCA), sous différentes conditions de chargement. Cet appareil permet non seulement de solliciter des éprouvettes de tailles importantes par rapport à celles utilisées lors des essais classiques, mais aussi d'effectuer des essais en conditions quasi-homogènes, ce qui permet de donner accès à la loi de comportement des matériaux. Les essais sont réalisés sur une large gamme de températures et de fréquences (de -15 °C à 45°C et de 0,03Hz à 10 Hz).

Cette étude a été menée principalement pour comparer le comportement d'un bitume avec celui d'un mastic bitumineux dans le domaine des petites déformations. Néanmoins, dans une seconde perspective, on s'intéresse à l'influence des fillers de verre de post-consommation sur le comportement d'un mastic à faibles niveaux de déformations en comparant l'évolution des modules complexes de cisaillements (G^*) d'un mastic avec fillers de verre et un mastic avec fillers conventionnels (calcaire).

Enfin, le modèle analogique 2S2P1D est utilisé pour simuler le comportement viscoélastique linéaire des bitumes et des mastics bitumineux testés lors de la campagne expérimentale.

Mots-clés : rhéologie, mastic, verre, petites déformations.

DEVELOPMENT OF ANULAR SHEAR RHEOMETER FOR THE STUDY OF MASTIC'S RHEOLOGY WITH INCORPORATED GLASS

Souleimane EL MANSOURI

ABSTRACT

This research mastery program focuses on the evaluation of thermomechanical behavior of bitumen and mastic (mixture of bitumen and fillers) in the linear viscoelastic field. This characterisation was realized at the Laboratory of Roads and Bituminous Materials (LCMB) of the "École de technologie supérieure" (ÉTS) in collaboration with the industrial partners "Société des Alcools du Québec" (SAQ) and "Éco Entreprises Québec" (ÉEQ).

The rheological properties of bitumen and mastic were measured with a new device called Annular Shear Rheometer (ASR) under various loading conditions. This machine allows not only to test samples larger than those used in conventional tests, but also to make homogeneous analyses, which gives access to the law of behaviour's materials.

The tests are performed on a wide range of temperatures and frequencies (from -15°C to 45°C and 0.03Hz to 10Hz). The main objective of this study is to compare the behavior of bitumen and mastic in the field of small deformations. The influence of the incorporation of recycled glass particles on the behavior of mastic at low levels of deformations was also studied by comparing the evolution of complex modules shear (G^*) of mastic with recycled glass particles and conventional fillers (limestone).

Finally, the analog 2S2P1D model is used to simulate the linear viscoelastic behavior of the bitumen and bituminous mastics tested during the experiments.

Keywords: rheology, mastic, recycled glass, small deformations.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE	3
1.1 Présentation générale de l'enrobé bitumineux et de ses constituants	3
1.1.1 La structure de chaussée	3
1.1.2 L'enrobé bitumineux EB.....	4
1.1.2.1 Définition	4
1.1.2.2 Teneur en liant	5
1.1.2.3 Types d'enrobés	6
1.1.2.4 Propriétés essentielles des enrobés	7
1.1.2.5 Utilisation de l'EB en construction de chaussées	8
1.1.2.6 Incorporation du verre de post-consommation dans les EB	10
1.1.3 Le bitume	12
1.1.3.1 Origine et utilisations	12
1.1.3.2 Composition chimique et structure des bitumes	13
1.1.3.3 Principaux types de bitume	16
1.1.3.4 Fabrication des bitumes	17
1.1.3.5 Classification des bitumes.....	19
1.1.4 Les granulats	19
1.1.4.1 Origine	19
1.1.4.2 Classification des granulats.....	20
1.1.4.3 Propriétés des granulats	21
1.1.4.4 Les fillers	22
1.2 Généralités sur les propriétés rhéologiques du liant bitumineux	23
1.2.1 Classes de comportements des bitumes purs en fonction de ϵ et T	24
1.2.2 Méthodes de détermination des caractéristiques classiques des bitumes ..	25
1.2.2.1 Pénétrabilité	25
1.2.2.2 Point de ramollissement bille et anneau.....	25
1.2.2.3 Viscosité Brookfield	26
1.2.2.4 Rhéologie à basses températures (BBR).....	27
1.2.2.5 Rhéologie à hautes températures (DSR).....	28
1.2.2.6 Vieillissement à court terme (RTFOT).....	30
1.2.2.7 Vieillissement à long terme (PAV).....	31
1.3 Comportement mécanique des matériaux bitumineux dans le domaine (VEL)	32
1.3.1 Définition d'un corps viscoélastique	32
1.3.2 Définition d'un corps viscoélastique linéaire	33
1.3.3 Fonction de retard (ou de fluage) et fonction de relaxation.....	33
1.3.3.1 Fonction de retard (ou de fluage).....	33
1.3.3.2 Fonction de relaxation.....	36
1.3.4 Module de Young complexe E^* et module de cisaillement complexe G^*	37
1.3.5 Équivalence temps-température (PSTT ou PETT)	39

1.3.6	Relation entre le comportement (VEL) du liant et celui de l'enrobé.....	41
1.3.6.1	Méthode de Heukelom et Klomp.....	42
1.3.6.2	Méthode d'Ugé et al.....	43
1.3.6.3	Relation de Francken et coll.	44
1.3.6.4	Transformation géométrique de Di Benedetto et coll.....	45
1.4	Modélisation du comportement VEL des matériaux bitumineux : assemblages à spectre continu	47
1.4.1	Modèle de Huet.....	47
1.4.2	Modèle de Huet-Sayegh.....	49
1.4.3	Modèle 2S2P1D (2 Springs, 2 Parabolic, 1 Dashpot).....	51
1.5	Propriétés rhéologiques des mastics bitumineux	52
1.5.1	Définitions et généralités	52
1.5.2	Propriétés rhéologiques des mastics bitumineux	53
1.5.2.1	Caractéristiques physiques des fillers	54
1.5.2.2	Nature des fines.....	55
1.5.2.3	Effet de la teneur en fillers sur le comportement du mastic	57
1.5.2.4	Mécanismes de renforcement du bitume par le filler.....	59
1.5.2.5	Influence des fillers de verre post-consommation sur les caractéristiques rhéologiques des mastics (résultats préliminaires)	60
CHAPITRE 2	PRÉSENTATION DE L'ESSAI DE CISAILLEMENT ANNULAIRE.....	63
2.1	Principe de fonctionnement	64
2.2	Appareils et instruments de mesures.....	75
2.2.1	Presse MTS 810	75
2.2.2	Enceinte thermique	76
2.2.3	Capteurs de déformations (extensomètres).....	76
2.2.4	Capteurs de forces (cellules de charges).....	78
2.2.5	Capteurs de températures.....	79
2.2.6	Système d'acquisition et pilotage	80
2.3	Préparation et montage des échantillons.....	81
2.3.1	Préparation de l'éprouvette	81
2.3.2	Montage des échantillons.....	81
2.3.3	Mise en température du RCA	83
2.3.4	Système de mise en pression.....	83
2.4	Pilotage, acquisition et traitement des données	86
2.4.1	Pilotage	86
2.4.2	Acquisition des données	87
2.4.3	Traitement des données.....	88
2.5	Domaine de linéarité et endommagement de l'éprouvette	92
2.5.1	Domaine de linéarité	92
2.5.2	Distorsions imposées	96
2.5.3	Endommagement de l'éprouvette.....	98

CHAPITRE 3	PRÉSENTATION DU PROGRAMME EXPÉRIMENTAL.....	101
3.1	Objectifs de l'étude.....	101
3.2	Programme expérimental.....	102
3.3	Matériaux utilisés.....	103
3.3.1	Bitume PG 58-28	103
3.3.2	Fillers de verre	103
3.3.3	Fillers de calcaire	104
CHAPITRE 4	PRÉSENTATION ET ANALYSE DES RÉSULTATS.....	105
4.1	Homogénéité des mastics.....	105
4.1.1	Objet.....	105
4.1.2	Principe et méthodologie	106
4.1.3	Résultats et conclusion.....	107
4.2	Comportement du bitume PG 58-28 et des mastics PG 58-28/V/40 et PG 58-28/C/40 dans le domaine des petites déformations	108
4.2.1	Le mastic PG 58-28/V/40	109
4.2.1.1	Courbe maîtresse (master curve)	109
4.2.1.2	Évolution du module complexe dans le plan Cole-Cole et dans l'espace de Black	113
4.2.2	Le mastic PG 58-28/C/40.....	115
4.2.2.1	Courbes maîtresses.....	115
4.2.2.2	Évolution du module complexe dans le plan Cole-Cole et dans l'espace de Black	118
4.2.3	Le bitume PG 58-28 (liant seul sans fillers)	120
4.2.3.1	Courbes maîtresses.....	120
4.2.3.2	Évolution du module complexe dans le plan Cole-Cole et dans l'espace de Black	123
4.3	Différences entre mastic et bitume (ex de mastic PG 58-28/V/40 et bitume PG 58-28).....	125
4.4	Différences entre le mastic PG 58-28/V/40 et le mastic PG 58-28/C/40	128
4.5	Écarts des modules complexes des matériaux	130
4.6	Paramètres de calage du modèle 2S2P1D.....	134
4.7	Vérification de l'endommagement des éprouvettes	140
4.7.1	Le bitume PG 58-28.....	140
4.7.2	Le mastic PG 58-28/V/40	141
4.7.3	Le mastic PG 58-28/C/40.....	142
4.8	Application de la transformation géométrique de Di Benedetto et coll.....	143
CONCLUSION.....		147
RECOMMANDATIONS		149
ANNEXE I	PROCÉDURE DE PRÉPARATION D'UNE ÉPROUVETTE ANNULAIRE DE BITUME OU DE MASTIC.....	151
ANNEXE II	PRÉSENTATION DE LA MÉTHODE DES MOINDRES CARRÉS...	161

ANNEXE III	GRAPHES DE LINÉARITÉ DU MASTIC PG 58-28/C/20	165
ANNEXE IV	DISTORSIONS IMPOSÉES LORS DE L'ESSAI DE CISAILLEMENT ANNULAIRE	169
ANNEXE V	FICHES TECHNIQUES DES MATÉRIAUX UTILISÉS	173
ANNEXE VI	HOMOGÉNÉITÉ DES MASTICS BITUMINEUX	175
ANNEXE VII	PROCÉDURE D'UTILISATION DU MODÈLE 2S2P1D	191
ANNEXE VIII	COUPES DE LA CELLULE DE CISAILLEMENT ANNULAIRE	201
	LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	203

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1 Principales caractéristiques des différents types d'enrobés utilisés au Québec	7
Tableau 1.2 Classification des granulats suivant leur granularité	21
Tableau 1.3 Propriétés des granulats	22
Tableau 1.4 Principe de superposition de Boltzmann	33
Tableau 1.5 Caractéristiques des fillers de verre A	61
Tableau 2.1 Paramètres recherchés et approchés par la méthode des moindres carrés pour le calcul de la distorsion et de la contrainte de cisaillement...	90
Tableau 2.2 Distorsions correspondant à la limite de linéarité.....	97
Tableau 2.3 Distorsions imposées lors de l'essai de cisaillement annulaire.....	97
Tableau 3.1 Programme expérimental.....	102
Tableau 4.1 Teneurs en fillers obtenues dans chaque section après calcination du bitume.....	107
Tableau 4.2 Calage du modèle 2S2P1D pour les trois matériaux testés	136
Tableau 4.3 Calage du modèle 2S2P1D : valeurs des paramètres pour chaque matériau, $T_R = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (France)	137

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Exemple d'une coupe type d'une chaussée 4
Figure 1.2	Schéma illustrant la notion de film de bitume effectif (FBE) 6
Figure 1.3	Schéma des sollicitations induites par le trafic..... 9
Figure 1.4	Verre de type mixte concassé 11
Figure 1.5	Schéma de séparation chimique des constituants de bitume 14
Figure 1.6	Schéma de la structure colloïdale du bitume 15
Figure 1.7	Représentation schématisée d'un bitume de type : (a) sol et (b) gel..... 16
Figure 1.8	Fabrication des bitumes 18
Figure 1.9	Classes de comportement des bitumes en fonction de $ \epsilon $ et T 24
Figure 1.10	Pénétrromètre 25
Figure 1.11	Essai de point de ramollissement-Température Bille et Anneau..... 26
Figure 1.12	Viscosimètre de Brookfield (LCMB) 27
Figure 1.13	Schématisation de l'essai BBR..... 28
Figure 1.14	Courbe de fluage..... 28
Figure 1.15	a) Rhéomètre DSR b) Pastille DSR (LCMB) 29
Figure 1.16	Disposition des fioles à l'intérieur de l'étuve RTFOT 30
Figure 1.17	a) Schéma de principe de l'essai PAV b) éprouvette de bitume..... 31
Figure 1.18	Expérience d'effacement : a) créneau de déformation b) réponse du matériau 32
Figure 1.19	Essai de fluage –Comportement à une contrainte σ_0 34
Figure 1.20	Sollicitation à contrainte variable dans le temps 35
Figure 1.21	Essai de relaxation – Comportement à déformation constante..... 36

Figure 1.22	a) Exemple de courbe de module complexe dans l'espace de Black d'un bitume b) Isothermes du même bitume pur.....	39
Figure 1.23	Exemple d'isothermes et de courbe de maitresse à 10°C d'un enrobé fabriqué à partir d'un bitume pur.....	40
Figure 1.24	Relation entre l'angle de phase des enrobés et celui des liants	45
Figure 1.25	Prédiction du module complexe de l'enrobé à partir de celui du liant dans le plan Cole-Cole.....	47
Figure 1.26	Représentation du modèle de Huet.....	49
Figure 1.27	Représentation du modèle de Huet-Sayegh.....	50
Figure 1.28	Exemple de courbes de module complexe des modèles Huet et Huet-Sayegh dans le plan Cole-Cole.....	51
Figure 1.29	Représentation du modèle 2S2P1D	52
Figure 1.30	Influence de la taille des fines sur la contrainte de rupture du mastic.....	55
Figure 1.31	Rigidification du bitume par différentes concentrations de fines.....	58
Figure 1.32	Contrainte de rupture (traction) en fonction de la fraction volumique et du niveau de déformation	59
Figure 1.33	Couches de bitumes adsorbées	60
Figure 2.1	Rhéomètre à cisaillement annulaire (Réalisé par Catia V5).....	65
Figure 2.2	Éléments constituant le rhéomètre à cisaillement annulaire.....	66
Figure 2.3	a) Cellule de cisaillement annulaire avec plaque de stabilisation soulevée b) Cellule de cisaillement annulaire avec plaque de stabilisation en position basse.....	67
Figure 2.4	Représentation d'un cylindre creux en coordonnées polaires	68
Figure 2.5	Éprouvette sollicitée en cisaillement	69
Figure 2.6	Section diamétrale d'une éprouvette non sollicitée	70
Figure 2.7	Section diamétrale d'une éprouvette sollicitée	71
Figure 2.8	Coupe du montage	72

Figure 2.9	Angle de déphasage entre une courbe de contrainte de cisaillement et une courbe de distorsion	74
Figure 2.10	Presse MTS810 (LCMB).....	75
Figure 2.11	Extensomètre et tiges de fixation en aluminium (LCMB)	77
Figure 2.12	Capteur de force (LCMB).....	79
Figure 2.13	Capteurs de température PT100 (LCMB)	80
Figure 2.14	RCA monté sur une presse hydraulique (LCMB)	82
Figure 2.15	Fluage du liant dans le tuyau contenant l'air sous pression à 35 °C (LCMB).....	84
Figure 2.16	Dispositif de mise en pression (LCMB).....	85
Figure 2.17	Papier ciré placé à la base du RCA pour empêcher le fluage du liant et permettre une distribution homogène de la pression d'air appliquée (LCMB)	86
Figure 2.18	Fichier de données brutes lors d'un essai ASR/PG 58-28/C/20 ($f_r = 1$ Hz et $T = 25^\circ\text{C}$).....	88
Figure 2.19	Signal de contrainte de cisaillement approché par la méthode des moindres carrés essai ASR/PG 58-28 ($f_r = 3$ Hz et $T = 25^\circ\text{C}$).....	91
Figure 2.20	Signal de distorsion approché par la méthode des moindres carrés essai ASR/PG 58-28 ($f_r = 3$ Hz et $T = 25^\circ\text{C}$)	91
Figure 2.21	Étude de linéarité d'un mastic composé du bitume PG58-28 et de 20 % de filler calcaire ($T = +5^\circ\text{C}$, $f_r = 1$ Hz).....	94
Figure 2.22	Signaux de γ et τ approchés par la MMC du mastic PG 58-28/C/20 testé à 5°C -1Hz a) et b) γ imposé de 0.3 % c) et d) γ imposé de 0.6 %.....	95
Figure 2.23	Étude de linéarité d'un mastic composé du bitume PG 58-28 et de 20 % de fillers calcaire ($T = -15^\circ\text{C}$, $f_r = 0,1$ Hz).....	96
Figure 2.24	Cycle de sollicitations imposé	98
Figure 2.25	Évolution du dommage potentiellement généré par la séquence de cyclage de sollicitation (D_{scs}) par palier de température.....	99
Figure 3.1	Dénomination utilisée pour les différents essais réalisés	102

Figure 3.2	Déchets du verre A retenus au tamis 315 μm	104
Figure 3.3	Fillers de calcaire et de verre utilisés lors des essais (Passants 160 μm et retenus 80 μm)	104
Figure 4.1	Les 5 éprouvettes pour évaluer l'homogénéité du mastic PG 58-28/VA/15	106
Figure 4.2	Concentrations en filler obtenues après calcination du bitume dans chaque section	108
Figure 4.3	Isothermes en module (mastic PG 58-28/V/40)	109
Figure 4.4	Courbe maîtresse de la norme du module complexe (mastic PG 58-28/V/40) ($T_R = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$)	110
Figure 4.5	Courbe maîtresse de l'angle de phase du module complexe (mastic PG 58-28/V/40).....	111
Figure 4.6	Coefficients de translation a_T (mastic PG 58-28/V/40) ($T_R = 25.9\text{ }^{\circ}\text{C}$) ..	112
Figure 4.7	Coefficients de translation obtenus par calage (mastic PG 58-28/V/40) ($T_R = 25.9^{\circ}\text{C}$)	113
Figure 4.8	Représentation du module complexe dans le plan Cole-Cole (mastic PG 58-28/V/40).....	114
Figure 4.9	Représentation du module complexe dans l'espace de Black (mastic PG 58-28/V/40).....	115
Figure 4.10	Isothermes en module (mastic PG 58-28/C/40)	116
Figure 4.11	Courbe maîtresse de la norme du module complexe (mastic PG 58-28/C/40) ($T_R = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$)	117
Figure 4.12	Courbe maîtresse de l'angle de phase (mastic PG 58-28/C/40) ($T_R = 10^{\circ}\text{C}$).....	118
Figure 4.13	Représentation du module complexe dans le plan Cole-Cole (mastic PG 58-28/C/40).....	119
Figure 4.14	Représentation du module complexe dans l'espace de Black (mastic PG 58-28/C/40).....	119
Figure 4.15	Isothermes en module (bitume PG 58-28).....	120

Figure 4.16	Courbe maîtresse de la norme du module complexe (bitume PG 58-28) ($T_R = 10\text{ °C}$).....	121
Figure 4.17	Courbes maîtresses des bitumes B4 et B5070	122
Figure 4.18	Courbe maîtresse de l'angle de phase (bitume PG 58-28) ($T_R = 10\text{ °C}$).....	123
Figure 4.19	Représentation du module complexe dans le plan Cole-Cole (bitume PG 58-28).....	124
Figure 4.20	Représentation du module complexe dans l'espace de Black (bitume PG58-28).....	124
Figure 4.21	Courbes maîtresses de la norme du module complexe du PG 58-28/V/40 et du PG 58-28 ($T_R=10\text{ °C}$)	126
Figure 4.22	Courbes maitresses en module du B5070 et B5070W100 μ 50	126
Figure 4.23	Courbes maîtresses de l'angle de phase du PG 58-28/V/40 et du PG 58-28 ($T_R = 10\text{ °C}$).....	127
Figure 4.24	Courbes maîtresses de l'angle de phase du B5070 et B5070W100 μ 50 ...	128
Figure 4.25	Courbes maîtresses de la norme du module complexe du PG 58-28/V/40 et du PG 58-28/C/40 ($T_R = 10\text{ °C}$)	129
Figure 4.26	Courbes maîtresses de l'angle de phasedu PG 58-28/V/40 et du PG 58-28/C/40 ($T_R = 10\text{ °C}$).....	130
Figure 4.27	Évolution de la norme du coefficient de renforcement complexe en fonction de la fréquence équivalente ($T_R = 10\text{ °C}$).....	132
Figure 4.28	Évolution de l'angle de phase du coefficient de renforcement complexe en fonction de la fréquence équivalente ($T_R = 10\text{ °C}$)	133
Figure 4.29	Représentation dans le plan Cole-Cole des modules complexes mesurés et modélisés des différents matériaux.....	135
Figure 4.30	Représentation dans l'espace de Cole-Cole des modules complexes mesurés et modélisés des différents matériaux français	135
Figure 4.31	Coefficients de translation a_T des trois matériaux testés en fonction de la température ($T_R = 10\text{ °C}$)	139
Figure 4.32	Coefficients de translation des matériaux fabriquées en France à base du liant styrel 13/40	139

Figure 4.33	Évolution du dommage potentiellement généré par la séquence de cyclage de sollicitation (D_{scs}) par palier de température (bitume PG 58-28).....	141
Figure 4.34	Évolution du dommage potentiellement généré par la séquence de cyclage de sollicitation (D_{scs}) par palier de température (mastic PG 58-28/V/40)	142
Figure 4.35	Évolution du dommage potentiellement généré par la séquence de cyclage de sollicitation (D_{scs}) par palier de température (mastic PG 58-28/C/40).....	143
Figure 4.36	Transformation SHStS des mastics PG 58-28/V/40 et PG 58-28/C/40 à partir du bitume PG 58-28	145
Figure 4.37	Données expérimentales et prédites du mastic PG 58-28/V/40	146
Figure 4.38	Données expérimentales et prédites du mastic PG 58-28/C/40.....	146

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

2S2P1D	Combinaison de deux ressorts (Springs), deux éléments paraboliques (Parabolics) et un amortisseur (Dashpot)
AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ASR	<i>Annular Shear Rheometer</i> (Rhéomètre à Cisaillement Annulaire)
BBR	<i>Bending Beam Rheometer</i> (Rhéomètre à Flexion de Poutre)
CS2	Sulfure de carbone
DSR	<i>Dynamic Shear Rheometer</i> (Rhéomètre à Cisaillement Dynamique)
EB	Enrobé bitumineux
EC	Enrobé de correction
ECF	Enrobé coulé à froid
ÉEQ	Éco Entreprise Québec
EG	Enrobé grenu
ENTPE	Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat
ÉTS	École de technologie supérieure
EGM	Enrobé grenu en couche mince
ESG	Enrobé semi-grenu
FBE	Film de bitume effectif
FR	France
GB	Grave bitume
GBR	Granulats bitumineux recyclés
GNM	Grosseur nominale maximale
IP	Indice de pénétration

ITS	<i>Indirect Tensile Strength</i>
LC	Laboratoire des chaussées
LCMB	Laboratoire sur les Chaussées et Matériaux Bitumineux
LCPC	Laboratoire centrale des ponts et chaussées
MMC	Méthode des moindres carrés
M. et/ou Mr	Monsieur
MTQ	Ministère des Transports du Québec
MTS	<i>Mechanical Testing and Simulation</i>
NF	Norme française
PAV	<i>Pressure Aging Vessel</i> (Essai de vieillissement PAV)
Pr	Professeur
PETT	Principe d'équivalence temps-température
PG	<i>Performance grade</i> (Classe de performance)
PIDF	Proportionnel-intégrale-dérivée avec filtre
PSTT	Principe de superposition temps-température
Qc	Québec
RCA	Rhéomètre à Cisaillement Annulaire
RTFOT	<i>Rolling Thin Film Oven Test</i> 5 (Essai de vieillissement RTFOT)
SAQ	Société des Alcools du Québec
SCS	Séquence de Cyclage de Sollicitation
SMA	<i>Stone Mastic Asphalt</i>
SHRP	<i>Strategic Highway Research Program</i>
SHStS	<i>Shift, Homothety, Shift & time- Shift</i>

TBA	Température Bille et Anneau
USA	<i>United States of America</i>
VA	Verre A
VEL	Viscoélastique linéaire
WLF	Loi de William-Landel-Ferry

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

%	Pourcentage
°	Degré
°C	Degré Celsius
°F	Degré Fahrenheit
°C/min	Degré Celsius par minute
ω	Pulsation
Σ	Surface spécifique des granulats
φ	Angle de phase, de déphasage ou de perte
φ_E	Angle de phase entre σ et ε
φ_{C^*}	Angle de phase du coefficient complexe de renforcement
φ_G	Angle de phase du module de cisaillement
φ_{moy}	Diamètre moyen de l'éprouvette annulaire
μm	Micromètre (10^{-6} m)
ε	Déformation
ε_{ext}	Déformation enregistrée par l'extensomètre
ε_0	Amplitude de déformation
$\underline{\underline{\varepsilon}}$	Tenseur de déformations
$ \varepsilon $	Module de la déformation
σ_p	Résistance à la traction
σ	Contrainte
$\underline{\underline{\sigma}}$	Tenseur de contraintes

XXVIII

σ_0	Amplitude de contrainte
∞	Infini
π	Pi
τ	Contrainte de cisaillement
τ_A	Amplitude du signal de contrainte de cisaillement pour la moyenne des 3 extenso
τ^*	Contrainte de cisaillement complexe
τ_0	Moyenne des signaux de contraintes enregistrées
$\tau(t)$	Temps de relaxation
γ	Distorsion
γ^*	Distorsion complexe
γ_A	Amplitude du signal de distorsion pour la moyenne des trois extenso
γ_0	Moyenne des signaux de distorsion
γ_{Ai}	Amplitude du signal de distorsion d'un seul extensomètre
γ_{0i}	Moyenne du signal de distorsion d'un seul extensomètre
$\gamma_{lin95\%}$	Distorsion imposée correspondant à la limite de linéarité
η	Viscosité newtonienne
ν^*	Coefficient de poisson complexe
ΔH	Énergie d'activation de relaxation
Δl	Déplacement relatif entre le cylindre interne et le cylindre externe
$\Delta \gamma_i$	Écart des amplitudes de distorsion pour les trois extensomètres par rapport à la moyenne des distorsions
$\Delta \varphi_i$	Écart des phases de distorsion par rapport à la phase moyenne

α	Constante dépend de la formulation de l'enrobé et/ou du vieillissement du matériau
β	Constante du modèle 2S2P1D sans unité
δ	Constante du modèle 2S2P1D sans unité
Γ	Fonction d'Euler de deuxième espèce
a	Constante
A	Aire de la section sur laquelle la force F est appliquée
A_X^c	Amplitude de la grandeur sur les 200 points
a_T	Coefficient de translation
$\arg(G^*)$	Argument du module complexe de cisaillement
b	Fraction volumique de bitume
B^*	Module réduit du bitume défini à partir du module en cisaillement du bitume
B	Bas
C	Calcaire
C^*	Coefficient complexe de renforcement (ou Coefficient complexe de rigidité)
$ C^* $	Norme du coefficient complexe de renforcement
C_1	Constante du matériau varie avec la température de référence (loi WLF)
C_2	Constante du matériau varie avec la température de référence (loi WLF)
c'_V	Pourcentage de vide
cm	Centimètre
D	Plus grande valeur du diamètre d'une particule granulaire
D_{scs}	Domage apparent engendré par la séquence de cyclage de sollicitation
d	Plus petite valeur du diamètre d'une particule granulaire

XXX

d/D	Étendue granulaire
$d\sigma$	Incrément de contrainte
$d\varepsilon$	Incrément de déformation
E	Module de Young
E^*	Module de Young complexe
$ E^* $	Module du module de Young complexe (module dynamique)
$\text{Re}(E^*)$	Partie réelle de E^*
$\text{Im}(E^*)$	Partie imaginaire de E^*
E_1	Module d'élasticité ($=\text{Re}(E^*)$)
E_2	Module de perte ($=\text{Im}(E^*)$)
E_0	Module instantané ou valeur maximale du module complexe de Young déterminée aux très hautes fréquences ($\omega \rightarrow \infty$) et basses températures
E_{00}	Module statique ou valeur minimale du module complexe de Young déterminée aux basses fréquences ($\omega \rightarrow 0$) et hautes températures
e	Épaisseur de l'éprouvette annulaire
F	Force mesurée par le capteur de forces
f_r	Fréquence
f_e	Fréquence équivalente (ou $f(\text{TR})$)
G	Module de cisaillement
G^*	Module complexe de cisaillement
$ G^* $	Norme du module complexe de cisaillement
$ G_{\text{Re}}^* $	Norme du module complexe de cisaillement mesurée à la même fréquence à la fin de l'essai
G'	Module élastique

G''	Module visqueux
$\text{Re}(G^*)$	Partie réelle de G^*
$\text{Im}(G^*)$	Partie imaginaire de G^*
G_1	Module d'élasticité ($=\text{Re}(G^*)$)
G_2	Module de perte ($=\text{Im}(G^*)$)
G_0	Module instantané ou valeur maximale du module complexe de cisaillement déterminée aux très hautes fréquences ($\omega \rightarrow \infty$) et basses températures
G_{00}	Module statique ou valeur minimale du module complexe de cisaillement déterminée aux basses fréquences ($\omega \rightarrow 0$) et hautes températures
g	Fraction volumique des granulats
Hz	Hertz
H	Haut
h	Paramètre du modèle 2S2P1D
i	Nombre complexe défini par $i^2 = -1$
$J(t, t_0)$	Fonction de fluage
k	Paramètre du modèle 2S2P1D
K_c	Ténacité
kPa	Kilopascal
kN	Kilonewton
K_x	Critère K_x
km/h	Kilomètre par heure
L	Hauteur de l'éprouvette annulaire
l_0	Longueur initiale des extensomètres

XXXII

m^2/kg	Mètre carré par kilogramme
Mm	Millimètre
mbar	Millibar
M	Milieu
MPa	Mégapascal
N	Newton
nm	Nanomètre
Pa	Pascal
$R(t,t_0)$	Fonction de relaxation
R	Constante des gaz parfaits
R^*	Module réduit de l'enrobé à la température T et la fréquence f_r
Sb	Module de rigidité du bitume
T ou θ	Température
T	Période
T_R ou T_S	Température de référence
T ou t	Temps
t_0	Temps à l'instant $t=0$
V	Verre
V_{be}	Volume de bitume effectif
X_k^m	Grandeur mesurée au point d'acquisition k ($0 \leq k \leq 200$)
X_k^c	Grandeur calculée avec la méthode des moindres carrés

INTRODUCTION

La dégradation des chaussées bitumineuses est un phénomène très répandu au Québec et dans la plupart des pays froids. Elle résulte non seulement des sollicitations excessives dues généralement à la circulation routière mais aussi à cause des variations climatiques. Afin de surmonter ce problème, l'étude de la rhéologie des enrobés bitumineux constituant la chaussée bitumineuse est indispensable pour la compréhension de son comportement thermomécanique en cours d'exploitation.

Au cours des dernières années, plusieurs études ont été menées au sein du Laboratoire des Chaussées et Matériaux Bitumineux (LCMB) de l'École de technologie supérieure (ÉTS) afin d'améliorer le comportement rhéologique des enrobés bitumineux conventionnels en intégrant des matériaux de post-consommation et de post-fabrication, notamment les granulats bitumineux recyclés (GBR) et les particules de bardeaux d'asphalte post-consommation. De plus, à l'heure actuelle, des essais portant sur l'incorporation du verre de recyclage dans les enrobés sont en cours de réalisation au LCMB avec l'appui de partenaires externes : la Société des Alcools du Québec (SAQ) et l'Éco Entreprise Québec (ÉEQ) qui ont accepté de mener ce projet et faire face aux difficultés que pose le recyclage de verre. En effet, l'utilisation du verre post-consommation dans les matériaux bitumineux et les chaussées vise en premier lieu à améliorer quelques propriétés des enrobés bitumineux, mais aussi de récupérer un matériau de qualité qui existe en grandes quantités dans les sites d'enfouissement québécois.

Il est important de mentionner qu'une bonne compréhension des enrobés bitumineux nécessite une bonne étude du liant dont ils sont composés. Dans cette optique, une nouvelle voie a été explorée récemment dans la plupart des pays industrialisés : l'étude de rhéologie du mastic bitumineux, liant intermédiaire constitué de bitume et de fillers (particules granulaires de diamètre inférieur à $315\mu\text{m}$). C'est dans cette perspective que s'inscrit notre projet de recherche qui a pour but principal d'étudier la rhéologie des mastics bitumineux avec verre incorporé dans le domaine viscoélastique linéaire, soit à faibles niveaux de déformations.

Pour relever ce défi, un nouvel outil d'investigation : le Rhéomètre à Cisaillement Annulaire (RCA), développé au laboratoire de l'École Nationale des Travaux Publics de l'État (ENTPE, France), a été conçu spécialement pour évaluer des éprouvettes de bitume ou de mastic bitumineux. Cet appareil qui est utilisé pour la première fois au LCMB lors de cette étude, consiste à tester des éprouvettes de cylindre creux et de tailles importantes relativement à celles utilisées lors des essais classiques de rhéologie. Par ailleurs, ce montage applique des sollicitations sinusoïdales de cisaillement sur des éprouvettes de forme annulaire, ce qui permet de considérer l'essai comme quasi-homogène, chose très importante pour l'analyse et l'interprétation des résultats.

En plus, le présent mémoire traite les études réalisées par d'autres chercheurs, qui portent sur la nature et le comportement thermomécanique des matériaux bitumineux essentiellement dans le domaine des petites déformations. Dans une seconde perspective, on présente l'appareil utilisé lors de la campagne expérimentale ainsi que le mode de déroulement des essais. Ensuite, on décrit le programme expérimental réalisé et les matériaux utilisés. Enfin, on présente les résultats d'essais de module complexe de cisaillement effectués sur les éprouvettes de bitume et de mastic bitumineux à l'aide du rhéomètre à cisaillement annulaire de grandes dimensions (RCA). Le modèle rhéologique 2S2P1D a été utilisé pour simuler le comportement viscoélastique linéaire des bitumes et des mastics bitumineux testés lors des essais sur une large gamme de températures et de fréquences.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

Cette partie traite d'anciennes études qui ont porté sur la nature et le comportement des matériaux bitumineux essentiellement dans le domaine viscoélastique linéaire, soit à faibles niveaux de déformation.

Dans un premier temps, nous présentons des généralités sur les enrobés bitumineux (EB) et leurs constituants (bitume et granulats) ainsi que leurs utilisations en structure de chaussées. Quelques propriétés des matériaux bitumineux sont alors introduites. Dans une seconde perspective, les propriétés rhéologiques du liant bitumineux sont abordées, ainsi que les principaux essais de caractérisation. Ensuite, le comportement mécanique des matériaux bitumineux dans le domaine viscoélastique linéaire (VEL) est introduit. Enfin, nous présentons les propriétés rhéologiques du mastic bitumineux, phase intermédiaire entre le liant et l'enrobé, ainsi que son comportement thermomécanique complexe.

1.1 Présentation générale de l'enrobé bitumineux et de ses constituants

1.1.1 La structure de chaussée

La chaussée, au sens large, est l'ensemble des éléments constituant la structure de la route. Il s'agit d'une structure multicouches composée de plusieurs matériaux de rôles différents (LCPC, 1994).

Les principaux éléments d'une chaussée sont donnés à la Figure 1.1. Il est important de mentionner que dans certaines chaussées, quelques-uns de ces éléments peuvent manquer, par contre d'autres en comportent davantage.

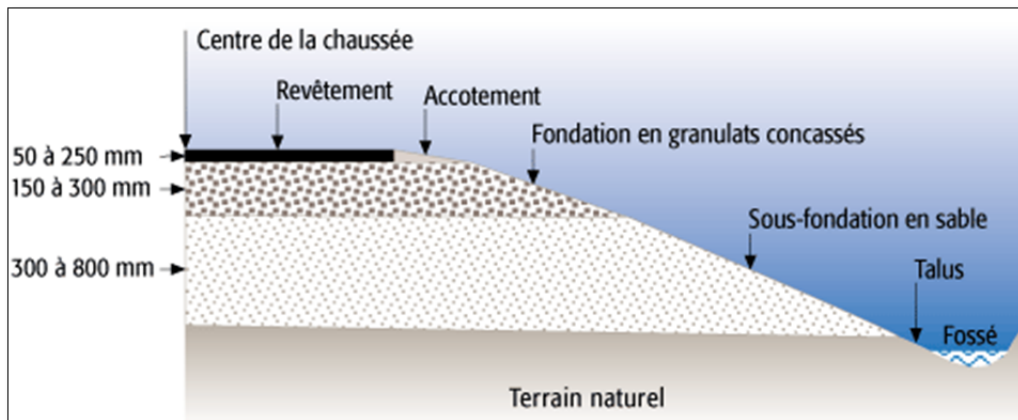


Figure 1.1 Exemple d'une coupe type d'une chaussée
Tirée de MTQ (2014)

Il existe deux catégories de chaussées : « les chaussées rigides » et « les chaussées bitumineuses » (ou encore nommées flexibles). Les chaussées rigides comportent une dalle de béton de ciment reposant sur une couche de fondation ou directement sur la plate-forme. Par contre, les chaussées bitumineuses sont constituées normalement d'un revêtement bitumineux, d'une couche de fondation et d'une couche de sous-fondation. Certaines chaussées constituées de plusieurs couches d'enrobés bitumineux sont presque aussi rigides que celles en béton de ciment, on parle alors de chaussées semi-rigides (très courantes, surtout en régions urbaines). On peut également retrouver des chaussées composées d'une ou de plusieurs couches d'enrobés bitumineux reposant sur une couche de fondation traitée avec du ciment, il s'agit de chaussées mixtes.

1.1.2 L'enrobé bitumineux (EB)

1.1.2.1 Définition

L'enrobé bitumineux est un mélange uniforme de granulats de différentes tailles (granulats et fines) et de liant bitumineux (5% de masse environ) fabriqué classiquement à haute température allant de 140°C jusqu'à 170°C selon la classe du bitume.

La fabrication de l'enrobé bitumineux par mélange de granulats et de liant bitumineux nécessite, en premier lieu, une bonne connaissance des propriétés du liant. Parmi ces propriétés, on peut citer :

- un pouvoir de cimentation et d'adhésion aux granulats;
- un comportement stable, en particulier, s'il est soumis à des variations de température;
- une bonne résistance au vieillissement.

1.1.2.2 Teneur en liant

Le liant bitumineux enrobe le squelette granulaire et confère la cohésion et l'imperméabilité à l'enrobé. Il vise donc à augmenter la rigidité et la résistance aux déformations des enrobés (Bitume Québec, 2008).

Le comportement thermomécanique de l'enrobé bitumineux dépend beaucoup du volume de liant introduit dans sa composition. Il faut déterminer une teneur en liant idéale afin d'assurer une bonne cohésion du mélange et un bon enrobage des particules du granulat par une surface plus ou moins épaisse nommée film bitumineux (Dumont et al, 2002; Delorme, 2005).

En France, la teneur en liant dans un enrobé est déterminée à l'aide de la surface spécifique des granulats (Σ), exprimée en m^2/kg et correspond à la surface développée qu'auraient les granulats assimilés à des sphères (Dumont et al, 2002; Delorme, 2005). Cependant au Québec, la méthode de formulation du Laboratoire des chaussées (LC) utilise la notion de volume de bitume effectif (V_{be}). Ce dernier représente le volume de bitume qui enrobe chacune des particules constituant l'enrobé (Perraton, 2012). Il s'agit tout simplement de la quantité de bitume non absorbée par les pores des granulats. Le V_{be} se traduit par une épaisseur de recouvrement nommée FBE (Film de bitume effectif).

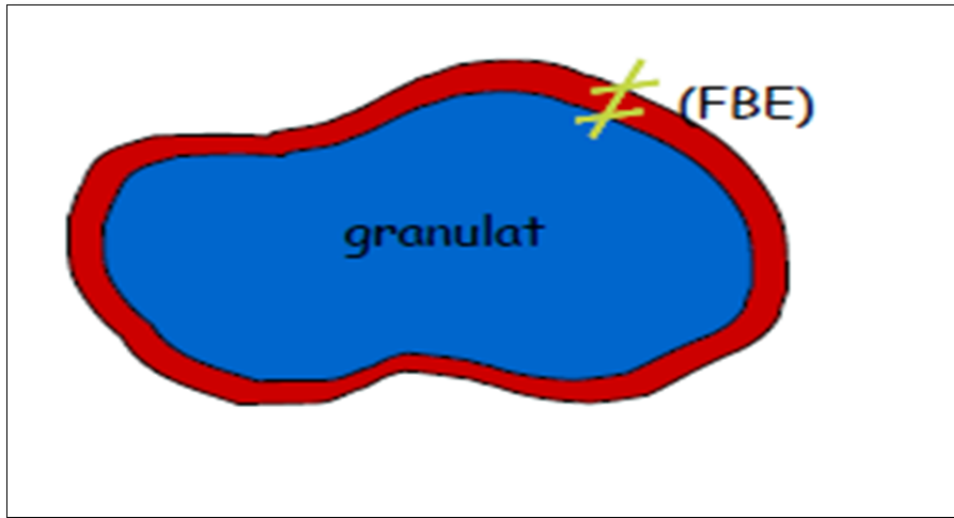


Figure 1.2 Schéma illustrant la notion de film de bitume effectif (FBE)
Tirée de Perraton (2012)

1.1.2.3 Types d'enrobés

Le Ministère des Transports du Québec (MTQ) considère plusieurs types d'enrobés pour répondre à des applications spécifiques. Les différents types d'enrobé se distinguent notamment de par leur granularité, classe de bitume et différentes proportions de ses constituants (bitume, granulats et additifs).

Le Tableau 1.1 résume les différents types d'enrobés les plus couramment utilisés au Québec suivant leurs utilisations. À noter que la grosseur nominale maximale (GNM) des granulats est la dimension du plus petit tamis de la série normalisée qui est supérieur au premier tamis ayant un retenu plus grand que 10% (MTQ, 2013).

Tableau 1.1 Principales caractéristiques des différents types d'enrobés
utilisés au Québec

Adapté de Bitume Québec (2008, p. 5)

Description des enrobés bitumineux	Grosueur nominale maximale (mm)	Remarques
Enrobé Grenu (EG)	10	Enrobé pouvant contenir des fibres d'amianté (EGA10) ou en couche mince (EGM10)
Enrobé Semi- Grenu (ESG)	5,10 et 14	Selon la grosueur du granulat, cet enrobé est utilisé : -ESG14 en couche de base, -ESG5 utilisé seulement pour les chaussées à durée de vie prolongée -ESG14 en couche unique -ESG10 en couche de surface
Grave Bitume (GB)	20	Enrobé utilisé en couche de base (GB20)
Enrobé de Correction (EC)	5,10	Enrobé utilisé pour la correction (EC10) et le rapiéçage (EC5)
Stone Mastic Asphalt (SMA)	10	Mélange utilisé en couche de surface (SMA10)
Enrobé Coulé à Froid(ECF)		Enrobé utilisé en couche de surface et en correction

1.1.2.4 Propriétés essentielles des enrobés

Les enrobés bitumineux doivent supporter les charges dues au trafic tout en résistant aux assauts des intempéries (froid, chaleur, produits déglçants, pollution, etc) et des tassements

et soulèvements des fondations de la chaussée causées par divers facteurs dont les cycles de gel/dégel (Transport Québec, 2005).

Voici les propriétés essentielles des EB (Lelièvre, 1994 et Transport Québec, 2005) :

- la stabilité (résistance aux déformations causées par les charges importantes),
- la durabilité (résistance à l'usure et aux intempéries),
- la résistance à la fissuration (résistance aux efforts causés par le retrait thermique et par la fatigue),
- la flexibilité (capacité de l'enrobé d'épouser les déformations de la chaussée sans se fissurer),
- le confort et la sécurité des usagers,
- la résistance à l'orniérage,
- la résistance à l'eau (désenrobage),
- la résistance au vieillissement (oxydation),
- la résistance à la perte des granulats (arrachement).

1.1.2.5 Utilisation de l'EB en construction de chaussées

L'enrobé bitumineux est le matériau le plus utilisé au Québec en construction de chaussées routières. En effet, la proportion de chaussées québécoises avec revêtement bitumineux est de 96 % (MTQ, 2012).

Ce matériau doit être en mesure de résister à plusieurs agressions, notamment celles dues au trafic et il doit assurer la distribution des efforts de surface à travers les couches de fondation et de sous-fondation. Ainsi, l'application d'une charge roulante provoque une déformation en flexion des couches de la structure de chaussée. Ceci entraîne, au droit de la charge, des sollicitations en compression à la surface du revêtement et des sollicitations en traction à la base des couches d'enrobé bitumineux. Chaque couche participe à un effet structurel et doit fournir des propriétés mécaniques permettant de résister aux sollicitations (Olard, 2003). Le schéma suivant montre les différentes sollicitations provoquées par la circulation.

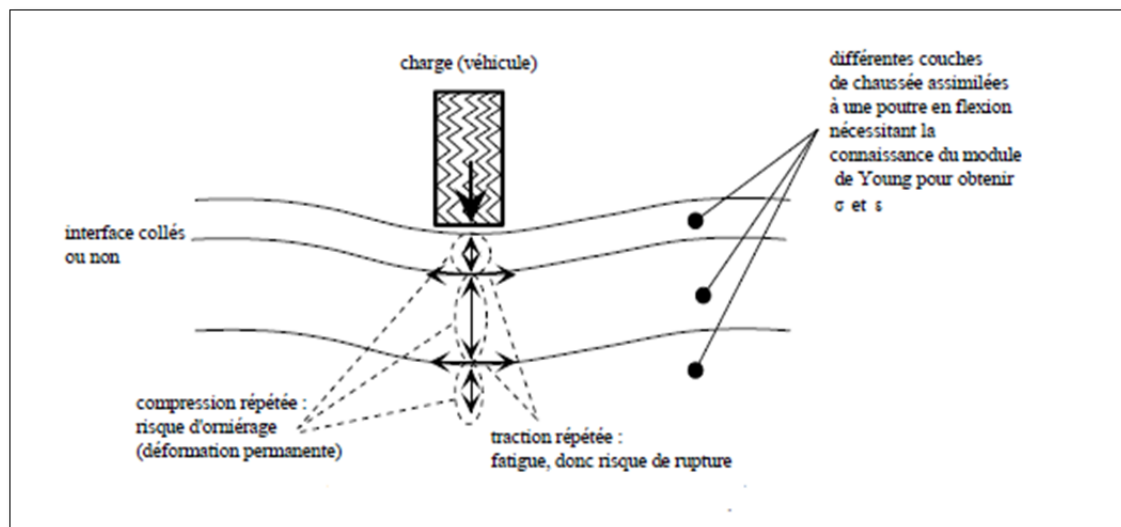


Figure 1.3 Schéma des sollicitations induites par le trafic
Tirée de Di Benedetto (1998)

Le passage répété des charges roulantes engendre des dégradations qui s'accumulent et peuvent ruiner le matériau. Les tractions répétées au bas des couches engendrent le phénomène de fatigue qui réduit progressivement la cohésion de l'enrobé à cause de l'accumulation de microfissures induites. Par ailleurs, les déformations permanentes, sous l'effet des compressions répétées induisent le phénomène d'orniérage observable à la surface de la chaussée. Cet orniérage peut être dû au tassement des couches d'enrobés bitumineux ou à cause des déformations de couches inférieures non traitées (Olard, 2003).

Les phénomènes de fatigue et d'orniérage vont dépendre du niveau de contraintes dans le revêtement de la chaussée bitumineuse. Le calcul des efforts et des déformations qui s'effectuent au niveau de la chaussée, nécessite la connaissance du module de Young, du coefficient de Poisson et des lois de comportement des matériaux utilisés, tout en considérant que chaque couche se comporte de façon linéaire, élastique et isotrope.

Un des objectifs de la présente étude est de caractériser le comportement des mastics bitumineux, constituant une phase intermédiaire entre le liant et l'enrobé, vis-à-vis notamment de la cohésion d'ensemble de l'enrobé. Pour ce faire, on souhaite mesurer la cohésion du mastic sous différentes conditions de chargement à l'aide du rhéomètre à

cisaillement annulaire afin de trouver des nouvelles corrélations entre les propriétés des mastics et celles des enrobés bitumineux et les différents constituants par exemple l'incorporation de matériaux recyclés dans l'enrobé.

1.1.2.6 Incorporation du verre post-consommation dans les EB

L'utilisation du verre post-consommation dans les structures de chaussées en EB vise à améliorer leur comportement et liquider les stocks de verre qui est actuellement en grandes quantités dans les sites d'enfouissement tout en minimisant les coûts d'exploitation (Lachance-Tremblay, Vaillancourt, Meunier, 2014 ou Lachance Tremblay, Vaillancourt et Perraton, 2015). Les premières études concernant la possibilité d'incorporer du verre post-consommation dans les chaussées ont débuté dans les années 70 (Waston, 1988). Vers la fin des années 80, l'idée d'utiliser le verre dans les EB a refait surface et concernait surtout les routes à faible volume et vitesse de circulation.

En dépit des résultats satisfaisants obtenus lors des premières études, l'intégration du verre recyclé dans les EB n'a pas été mise en œuvre à cause de son coût d'exploitation relativement élevé (transport, concassage...) (Waston, 1988).

La Figure 1.4 illustre un échantillon de verre mixte concassé utilisé dans les structures de chaussée.



Figure 1.4 Verre de type mixte concassé
Tirée de Lachance-Tremblay (2014)

Plusieurs chercheurs (Arabani, Mirabdolazimi, Ferdowzi, 2012) ont montré que les EB avec verre recyclé sont plus performants comparativement aux enrobés conventionnels et présentent plusieurs avantages. Parmi ces avantages, on cite :

- la résistance à la fissuration de fatigue,
- la maniabilité du mélange (l'enrobé avec verre se malaxe plus facilement comparativement à l'enrobé conventionnel);
- le faible taux d'absorption du verre comparé à celui des granulats naturels.

Cependant, il existe différents problèmes reliés à l'incorporation du verre dans les structures de chaussées (Kandhal, 1992) comme :

- la mauvaise adhésion entre le bitume et le verre,
- le manque d'adhérence entre le revêtement et les pneus des véhicules,
- le bris des particules grossières,
- le risque d'arrachement,
- l'augmentation de la sensibilité du mélange à l'eau.

1.1.3 Le bitume

Les bitumes, également appelés liants bitumineux, font parties des liants hydrocarbonés (bitumineux ou goudronneux) puisqu'ils sont composés essentiellement de carbone et d'hydrogène dont la couleur varie du brun foncé au noir. Il convient de distinguer les termes de bitume et de goudron souvent confondus. Les bitumes sont des termes génériques qui s'appliquent à des mélanges d'hydrocarbures solubles dans le sulfure de carbone (CS₂). Il existe trois types de bitumes : bitume pur, bitume modifié et bitume fluidifié. Par contre, le goudron est une substance sombre visqueuse obtenue par distillation sèche destructive sous pyrolyse de nombreuses matières organiques dont le charbon. Il est important de mentionner que les goudrons ne sont plus employés en construction routière au Canada du fait de leurs hautes teneurs en hydrocarbures aromatiques polycycliques cancérigènes provenant de la distillation/pyrolyse de la houille (Lesueur, 2002).

1.1.3.1 Origine et utilisations

Les bitumes proviennent généralement du pétrole brut. On peut trouver parfois des bitumes naturels presque purs qui sont le résultat d'une transformation naturelle de pétrole. À titre d'exemple, citons les lacs de bitume de « Trinidad », de « Judée » en France, de « Val de Travers » en Suisse, de « Bermudez » au Venezuela, de « la Brea » en Californie... (Lelièvre, 1994). Cependant, il revient moins cher d'obtenir le bitume par distillation de produits pétroliers bruts en raffinerie, on parle donc du « bitume de pétrole » ou encore nommé « résidu du pétrole ». C'est un résidu solide issu d'une distillation sous vide. À noter que tous les pétroles bruts ne sont pas en mesure de produire du bitume. En effet, à partir d'une certaine qualité de brut, divers mode de fabrication sont envisageables. Mais ils impliquent toujours le passage par la distillation (Corté et Di Benedetto, 2004).

Le bitume est employé en industrie dans divers travaux particulièrement en entretien et construction de chaussées sous forme d'enrobés, mais aussi dans d'autres domaines vu ses qualités d'étanchéité et d'isolation. Il peut donc être utilisé comme stabilisateur des matériaux granulaires ou fibreux, ou servir de colle grâce à ses propriétés d'adhérence et à

ses degrés élevés de cohésion. Le bitume peut également agir comme membrane ou couche imperméabilisante ou de protection grâce à son imperméabilité et à sa résistance aux acides, alcalis et sels. Il peut servir d'isolant électrique, grâce à ses propriétés diélectriques.

1.1.3.2 Composition chimique et structure des bitumes

Les bitumes sont des liants hydrocarbonés composés essentiellement de cinq éléments, à savoir (Lesueur, 1996) :

- le carbone : 79 % à 88%,
- l'hydrogène : 7% à 13%,
- l'oxygène : 2% à 8%,
- l'azote : jusqu' à 8%,
- quelques traces de nombreux métaux.

Par précipitation avec du n-heptane, les bitumes peuvent être séparés en deux grandes familles (*Voir* Figure 1.5).

Les asphaltènes : composés essentiellement de carbone et d'hydrogène. Ils forment un solide friable brun insoluble, apportant au bitume sa cohésion et sa dureté. Ils constituent 10% à 20% du bitume.

Les maltènes : molécules moins grosses représentent la fraction soluble dans l'heptane. Ils sont constitués principalement de produits huileux soit : les saturés, les aromatiques et les résines.

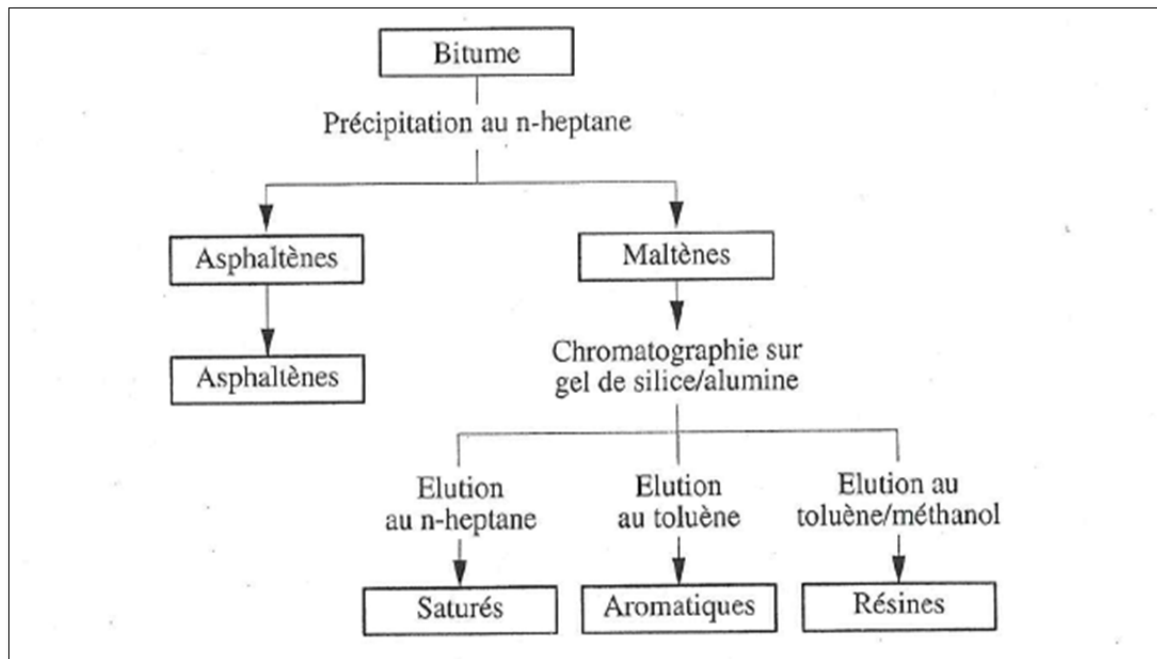


Figure 1.5 Schéma de séparation chimique des constituants de bitume
Tirée de Corté et Di Benedetto (2004)

L'ensemble asphaltènes/maltènes constitue un système colloïdal formé par des micelles (entités élémentaires de quelques feuillets de molécules) d'asphaltènes peptisées par les résines, suspendues dans un milieu huileux (*Voir* Figure 1.6). Les résines s'absorbent sur les asphaltènes permettant leur dispersion dans le mélange huileux (hydrocarbures aromatiques et saturés). Il s'agit du phénomène de peptisation. En effet, les aromatiques assurent le rôle de solvant, alors que les saturés assurent le rôle de flocculant (Olard, 2003).

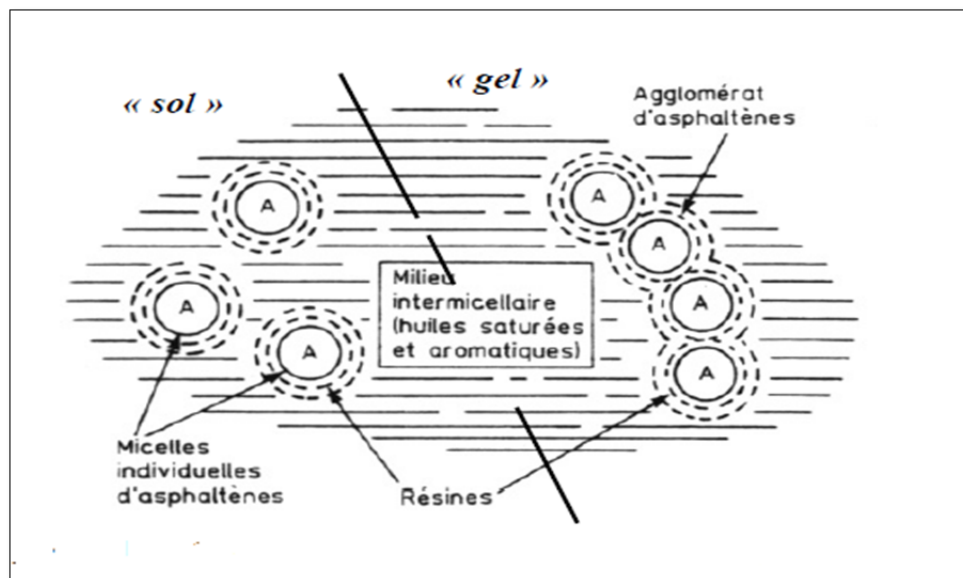


Figure 1.6 Schéma de la structure colloïdale du bitume
Tirée d'Olard (2003)

Lorsque la quantité de résines et d'aromatiques est assez importante pour qu'elle ait un pouvoir solvant adéquat, les asphaltènes sont entièrement peptisés, c'est-à-dire dispersés. Ce qui permet aux micelles d'avoir une assez grande mobilité au sein du liant bitumineux. Ce bitume qui présente des caractéristiques de liquide newtonien est qualifié de **sol** (Voir Figure 1.7 a)) (Corté et Di Benedetto, 2004).

Par contre, en présence d'une quantité insuffisante de résines et d'aromatiques ou ces derniers n'ont pas le caractère de solvant adéquat afin de peptiser les micelles, les asphaltènes sont donc flocculés. Ce qui conduit à une structure irrégulièrement ouverte de micelles liées ensemble ou les vides internes sont remplis d'un fluide intermicellaire. Dans ce cas, le bitume possède les caractéristiques d'un liquide non newtonien et se qualifie de **gel** (Voir Figure 1.7 b)) (Corté et Di Benedetto, 2004).

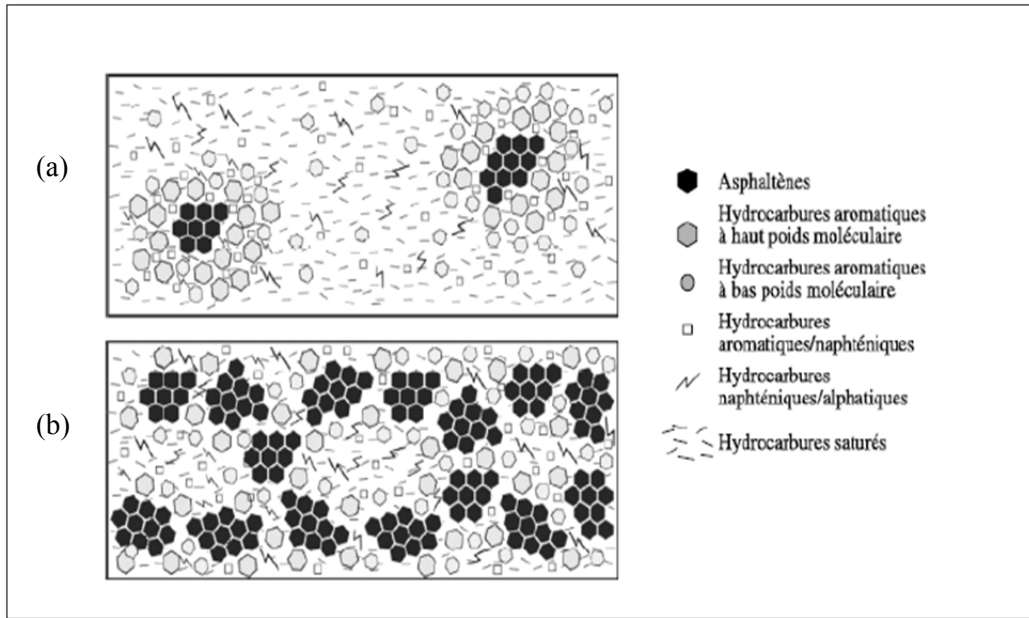


Figure 1.7 Représentation schématique d'un bitume de type : (a) sol et (b) gel
Tirée de Corté et Di Benedetto (2004)

1.1.3.3 Principaux types de bitume

Les bitumes industriels obtenus par distillation du pétrole brut en raffinerie et destinés aux revêtements de chaussées, sont très visqueux pour être utilisés à l'état pur limitant ainsi leur pouvoir d'enrobage des particules lorsque introduits dans l'enrobé. Ce qui nous amène à réduire leur viscosité, notamment par chauffage (120 à 160 °C). Cependant, il existe d'autres façons pour réduire la cohésion du bitume pour passer de l'état visqueux à l'état fluide (Lelièvre, 1994).

On peut procéder par solubilisation (habituellement dans un hydrocarbure) en ajoutant au bitume à l'état pur un diluant assez volatil comme le pétrole ou le kérosène. On parle ici de **bitumes fluidifiés**. On peut abaisser la viscosité du bitume par "émulsification" dans l'eau à l'aide d'un tensio-actif (savon). On obtient alors les **émulsions de bitume** (utilisées pour la fabrication des ECF). Quand on ajoute de l'eau, avec ou sans additifs, au bitume pour produire un enrobé tiède par moussage. On parle donc de **bitumes mousses**.

Lorsqu'on on ajoute des polymères au bitume afin d'améliorer une de ses propriétés, on parle de **bitumes modifiés** (encore nommés bitumes polymères).

1.1.3.4 Fabrication des bitumes

La séparation des différents hydrocarbures constituant le pétrole s'effectue par distillation du pétrole brut. De plus, le résidu obtenu sera redistillé sous vide dans le but d'obtenir un bitume raffiné. Ce procédé permet d'augmenter graduellement la température afin de produire des bitumes de plus en plus durs. On peut également transformer une partie des maltènes en asphaltènes en oxydant le résidu, on parle donc de soufflage de bitume. On arrive ainsi à fabriquer deux genres de bitume : un bitume dur et un bitume mou (*Voir Figure 1.8*). Lorsqu'on les combine en différentes proportions, on produit la classe de bitume semi-dur demandée (bitume routier destiné à la construction des chaussées) (Lelièvre, 1994).

On peut reconnaître le bitume routier à partir de ses propriétés :

- sa couleur noir,
- son inertie chimique,
- son imperméabilité à l'eau,
- sa susceptibilité à la température,
- son pouvoir d'adhésion et de rétention.

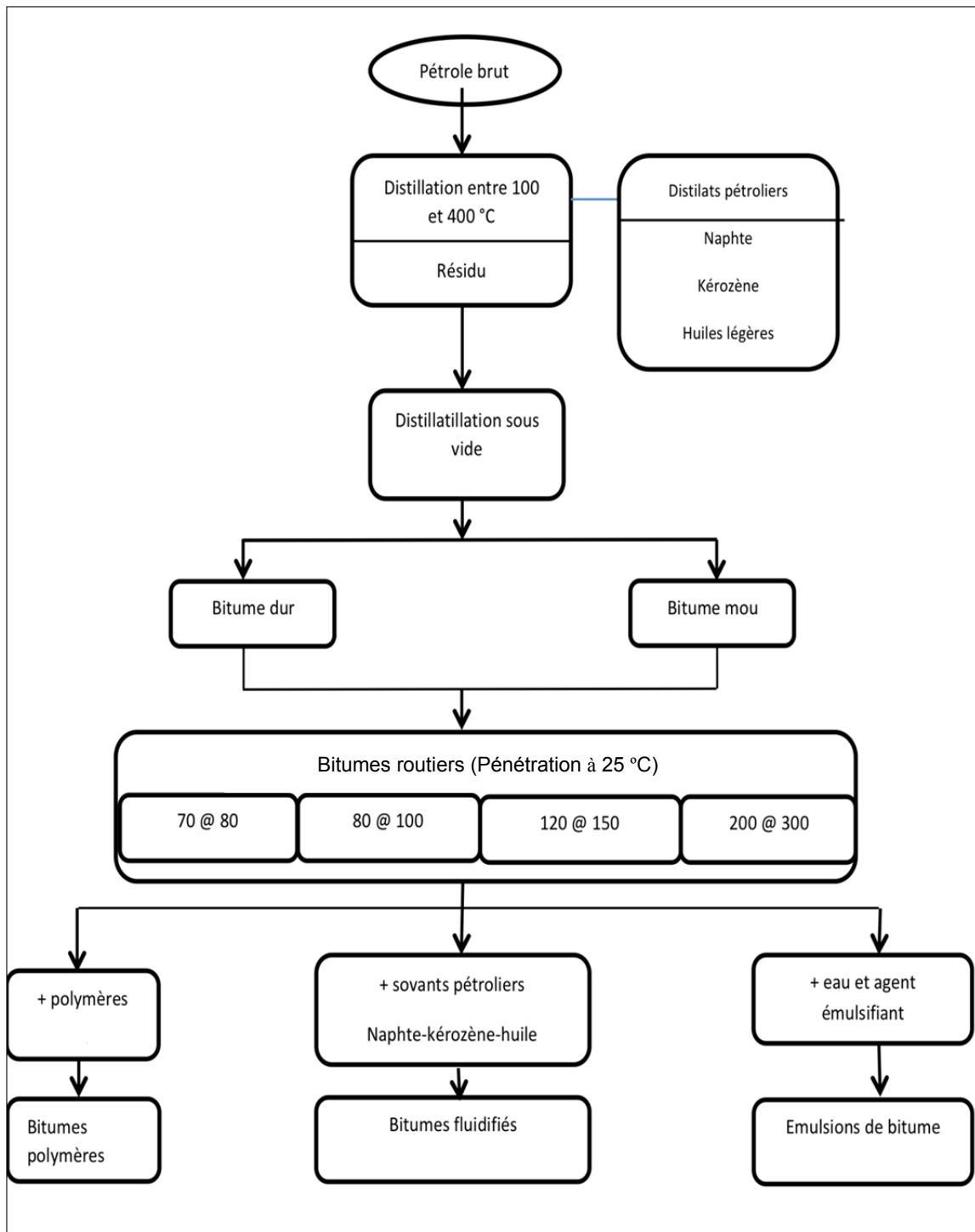


Figure 1.8 Fabrication des bitumes
Tirée de Lelièvre (1994)

1.1.3.5 Classification des bitumes

Selon la nouvelle norme américaine SHRP (Strategic Highway Research Program), la classification des bitumes se fait selon des classes de performances définies par PG, H et L (ex : PG 52-34, PG 58-28).

Avec :

- PG : classe de performance (performance grade);
- H : température au-dessus de laquelle le bitume présente des déformations irréversibles;
- L : température au-dessous de laquelle le bitume est susceptible de se fissurer par retrait thermique.

Par exemple, un bitume de classe PG 58-28 offre une résistance adéquate à l'orniérage jusqu'à une température maximale de 58°C. De plus, ce liant offre une résistance adéquate à la fissuration thermique jusqu'à -28°C (Bitume Québec, 2008). Les classes de performances les plus couramment utilisées en Amérique du nord sont : PG 52-34, PG 58-28, PG 58-40, PG 64-34, PG 70-34, PG 52-40, PG 58-34, PG 64-28, PG 70-28.

1.1.4 Les granulats

Les granulats représentent les principaux constituants de l'EB puisqu'ils constituent en moyenne 95 % de sa masse et environ 85 % de son volume. Cette importance quantitative de composants granulaires a sans aucun doute une influence sur les propriétés mécaniques et sur la qualité du matériau bitumineux.

1.1.4.1 Origine

Au Québec, les matériaux granulaires les plus utilisés sont ceux issus de roches ignées, métamorphiques ou sédimentaires. Les particules granulaires sont formées d'un ou de plusieurs minéraux retenus entre eux par une pâte ou par enchevêtrement de leurs cristaux. À titre d'exemple, citons le calcaire qui est constitué d'un seul minéral qui est la calcite alors que le granite en compte trois : le quartz, le feldspath et le plagioclase.

Il convient de mentionner que les granulats destinés à la fabrication des EB peuvent provenir de deux sources (Lelièvre, 1994) :

Source naturelle : Le granulat se trouve dans la nature presque prêt à être utilisé (sable, gravier, pierre...);

Source artificielle : Le granulat de source artificielle ou aussi appelée synthétique. Ce dernier n'est pas très employé au Québec dans les EB. Il peut être fabriqué à partir de laitiers de hauts fourneaux, de scories, de certains déchets comme les cendres, les tessons de bouteilles, de résidus de mines ou encore avec des minéraux transformés.

En revanche, la réutilisation de matériaux recyclés dans les matériaux de chaussées s'est avérée bénéfique d'un point de vue environnemental et souvent comportemental. L'idée d'incorporer des particules de verre post-consommation dans les enrobés bitumineux a refait surface récemment au LCMB (Lachance-Tremblay, 2014).

1.1.4.2 Classification des granulats

Il existe plusieurs méthodes de classification des granulats, à savoir la classification selon la granularité, soit la répartition des particules suivant leurs diamètres. Cependant, certains chercheurs les regroupent selon des classes associées à différents calibres : les classes granulaires (l'intervalle en millimètre des grosseurs nominales et minimales des particules) (Lelièvre, 1994).

Les granulats destinés à la fabrication des enrobés bitumineux peuvent être classés comme suit (MTQ, 2013) :

Le gros granulat : Partie du granulat dont les tailles des particules sont comprises entre 5 mm et 125 mm;

Le granulat fin : Partie du granulat dont les tailles des particules sont comprises entre 0 mm et 5 mm.

Le Tableau 1.2 donne la classification des granulats suivant leur granularité en France et au Québec.

Tableau 1.2 Classification des granulats suivant leur granularité
Adapté de Perraton (2012).a

Classe	Étendue granulaire : d/D	Dimension (mm)	
		France (Fr)	Québec (Qc)
Fine	0/D	$D \leq 0,080$	$D \leq 0,080$
Filler	0/D	$D \leq 0,080$	$D \leq 0,080$ $D < 0,315$
Sable	0/D	$D \leq 6,30$	
Granulat fin	0/D		$D < 5$
Gravillon	d/D	$D \geq 2,00$ et $D \leq 31,50$	$D \geq 2,50$ et $D \leq 31,50$
Gravier	d/D		$D \geq 2,00$ et $D \leq 20,00$
Caillou	d/D	$D \geq 20,00$ et $D \leq 80,00$	$D \geq 20,00$
Ballast	d/D		$D \geq 20,00$ et $D \leq 50,00$
Grave	0/D	$6,30 < D \leq 80,00$	$5,00 < D \leq 80,00$

Avec :

- d : Plus petite valeur du diamètre d'une particule granulaire;
- D : Plus grande valeur du diamètre d'une particule granulaire.

1.1.4.3 Propriétés des granulats

Les granulats doivent présenter des propriétés spécifiées par la norme afin d'être employés dans l'enrobé bitumineux. Parmi ces propriétés, on cite (Lelièvre, 1994) :

- l'absorptivité ou porosité superficielle à l'eau ou au bitume,
- la dureté, soit leur résistance à se laisser rayer,
- la forme ou divers degrés de sphéricité, d'angularité, d'allongement,
- la rugosité ou l'état plus ou moins lisse de leur surface,

- la ténacité ou résistance aux chocs,
- la densité ou rapport entre la masse et celle d'un égal volume d'eau,
- la granularité ou répartition des grains selon leur grosseur,
- le nombre pétrographique ou identification minéralogique quantifiée,
- la propreté ou absence de matières organiques,
- la résistance à l'abrasion,
- la résistance à l'attrition,
- la résistance à l'écrasement ou à la compression,
- la résistance aux cycles gel et dégel.

Tableau 1.3 Propriétés des granulats
Tiré de Bitume Québec (2008)

Propriétés	Description	Paramètres importants
Résistance aux chocs (à la fragmentation)	Propriété pétrographique du granulat	-Composition minéralogique des granulats - Forme, dimension et texture des granulats
Résistance à l'usure	Micro et macrotecture	- Composition minéralogique des granulats - Texture cristalline des granulats - Adhérence pneu-chaussée - Résistance au polissage
Résistance aux intempéries	Cycles de gel/dégel Cycles de mouillages / séchage	-Porosité des granulats -Taux d'absorption d'eau et de bitume du granulat -Charge électrostatique des granulats (affinité granulats-bitume).

1.1.4.4 Les fillers

Les fillers sont des éléments granulaires passant au tamis 315 μm (*Voir* Tableau 1.2). Comme tous les granulats, on distingue deux familles de fillers (Faure, 1998) :

- les fillers naturels fabriqués par concassage ou broyage des matériaux. Ils constituent 4% à 6 % du mélange en masse d'enrobé bitumineux;
- les fillers d'apport, introduits dans l'enrobé bitumineux à raison de 1% à 6%. Ces derniers complètent les fillers naturels apportés par les autres fractions granulaires pour atteindre le dosage requis. Les fillers les plus utilisés dans les enrobés sont :
 - les fillers calcaires : obtenus par le broyage d'une roche calcaire;
 - la chaux obtenue par cuisson d'une pierre calcaire;
 - les fillers de verre recyclé récemment étudiés au LCMB.

1.2 Généralités sur les propriétés rhéologiques du liant bitumineux

La rhéologie est l'étude de la déformation d'un corps sous l'effet des contraintes auxquelles il est soumis. La première classification des bitumes routiers fut essentiellement basée sur des essais non rhéologiques à savoir l'essai de pénétrabilité (péné), la température bille et anneau (TBA) et l'essai de viscosité. Cependant, les nouvelles classifications (PG) ont abandonné les essais traditionnels pour les essais rhéologiques à savoir l'essai de cisaillement DSR (*Dynamic Shear Rheometer*), BBR (*Bending Beam Rheometer*) et l'essai ITS (*Indirect Tensile Strength*). Tous ces essais partagent les mêmes essais relatifs au vieillissement dont l'essai RTFOT (*Rolling Thin Film Oven Test*) et PAV (*Pressure Aging Vessel*). Cependant, quelle que soit la méthode de classification, il est toujours important de mesurer l'évolution des propriétés du bitume vieilli par les essais traditionnels. Les méthodes traditionnelles de classification du bitume pur sont actuellement employées en France par la norme NF EN 12591. Les nouvelles méthodes, quant à elles, sont utilisées aux États-Unis et au Canada.

Dans cette partie, nous expliquons le comportement des liants bitumineux dans un premier temps, puis nous synthétisons les différents types d'essais de classifications des bitumes.

1.2.1 Classes de comportements des bitumes purs en fonction de ϵ et T

La température joue un rôle prépondérant dans le comportement rhéologique du liant bitumineux. Ainsi, selon Di Benedetto (Olard, 2003), cinq classes de comportements peuvent être identifiées en fonction de la déformation et de la température :

- les domaines ductile et fragile, où la résistance à la traction (σ_p) peut être mesurée;
- la rupture fragile, qui peut être caractérisée par la ténacité (K_c) ou l'énergie de rupture;
- le comportement élastique linéaire, caractérisé par les modules (E et G);
- le domaine viscoélastique linéaire, caractérisé par les modules complexe (E^* et G^*);
- le comportement purement visqueux (Newtonien), caractérisé par la viscosité (η).

Pour des déformations de l'ordre de quelques pour cent, le domaine où le comportement est fortement non linéaire. La Figure 1.9 illustre les différentes classes de comportement du liant bitumineux en fonction de la température et de la déformation.

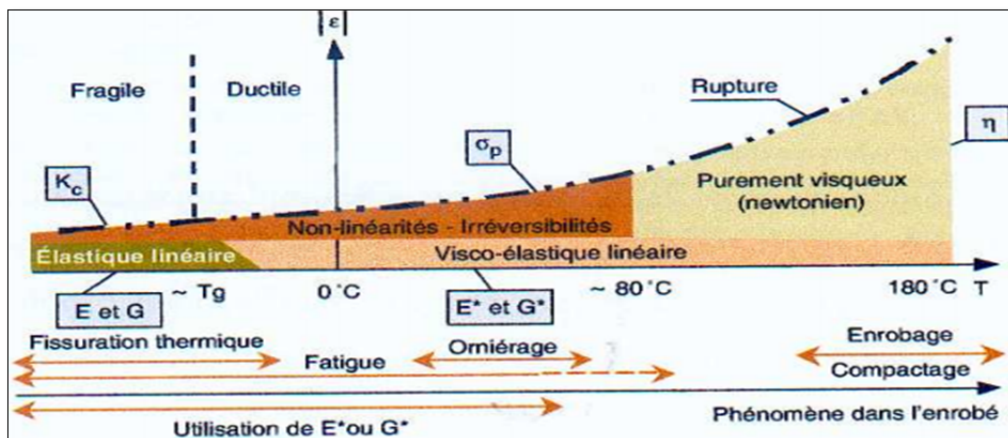


Figure 1.9 Classes de comportements des bitumes en fonction de $|\epsilon|$ et T
Tirée d'Olard (2003)

1.2.2 Méthodes de détermination des caractéristiques classiques des bitumes

1.2.2.1 Pénétrabilité

La pénétrabilité représente la mesure de l'enfoncement d'une aiguille normalisée selon la norme AASHTO T49 (Lelièvre, 2002) dans un bitume maintenu à une température donnée, au bout de 5 secondes sous une charge définie. Elle s'exprime en dixième de mm. La pénétrabilité la plus utilisée est celle mesurée à 25 °C et avec un chargement de 100 g (Voir Figure 1.10). Ainsi, à une température donnée, plus un bitume est dur, plus sa valeur de pénétrabilité est faible.

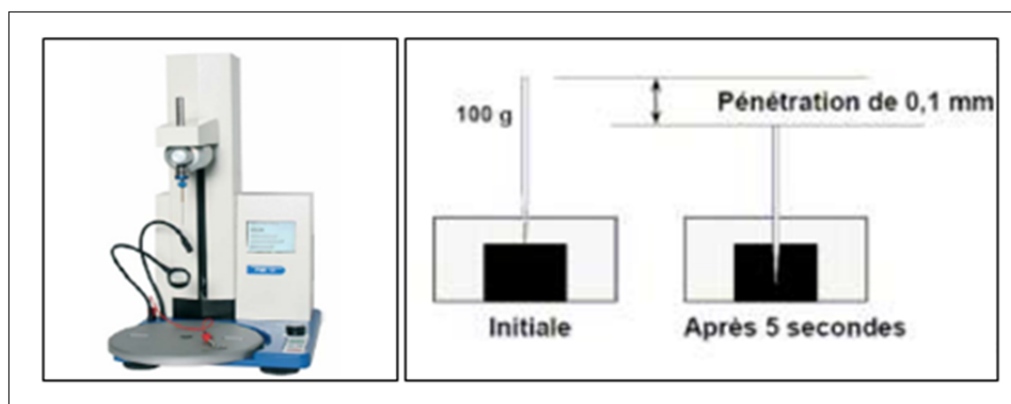


Figure 1.10 Pénétromètre

1.2.2.2 Point de ramollissement bille et anneau

L'essai de température bille et anneau (TBA), décrit par la norme AASHTO T 53 (Lelièvre, 2002), mesure la température de ramollissement des bitumes. Une bille est placée sur l'échantillon de bitume coulé dans un anneau et l'ensemble est plongé dans un bain avec un thermostat et chauffé pour obtenir une élévation régulière de la température de 5 °C/min. La température est automatiquement enregistrée au moment où la bille enrobée de liant touche la plaque inférieure du support (Voir Figure 1.11).

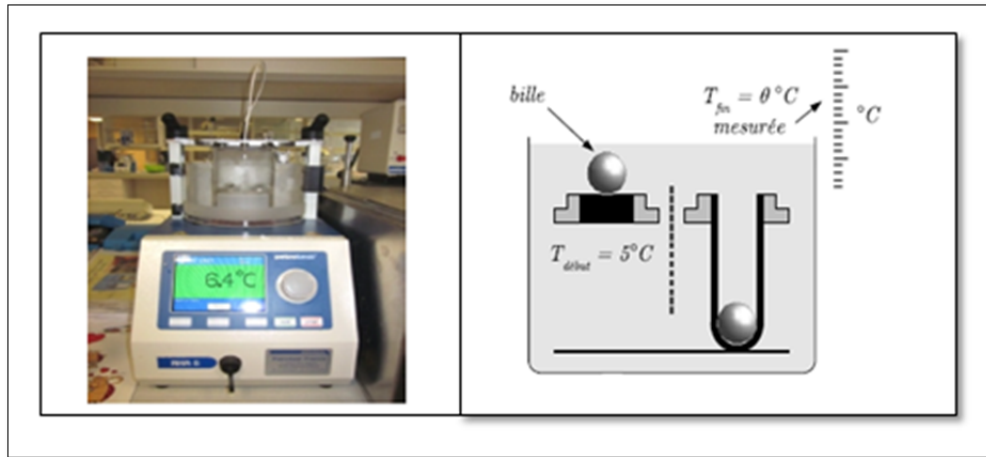


Figure 1.11 Essai de point de ramollissement-Température Bille et Anneau

1.2.2.3 Viscosité Brookfield

La viscosité se définit comme étant la propriété d'opposer une résistance à tout déplacement ou changement de forme. Elle peut se mesurer à l'aide de l'essai de viscosité Brookfield décrit par la norme AASHTO TP48 (Lelièvre, 2002).

Cet essai, réalisé à 135 °C, sert à mesurer la force pour maintenir, à une vitesse de rotation constante, un plongeur circulaire lorsque descendu dans la prise d'essai d'un échantillon de bitume amené préalablement à 135 °C et maintenu ainsi dans un bain de température constante (Lelièvre, 2002). La Figure 1.12 illustre un Viscosimètre Brookfield.

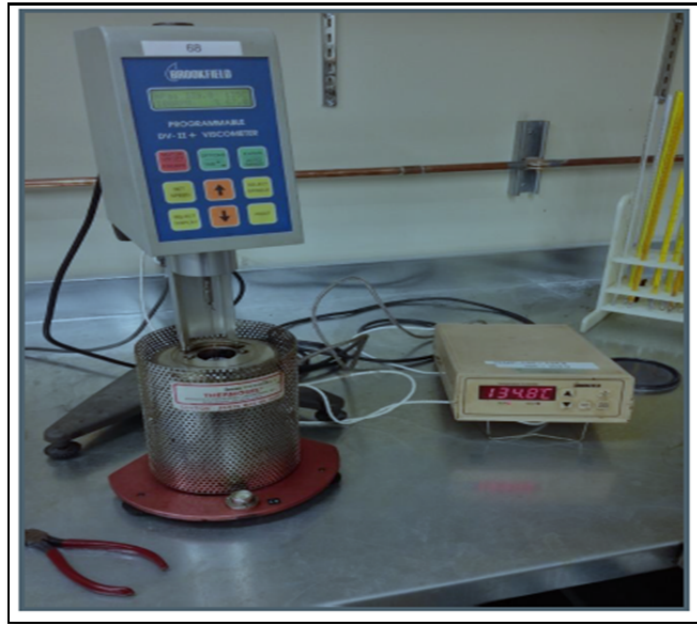


Figure 1.12 Viscosimètre de Brookfield (LCMB)

1.2.2.4 Rhéologie à basses températures (BBR)

L'essai BBR consiste à mesurer la rigidité du liant bitumineux à basse température par flexion. Il est décrit par la norme AASHTO TP1. Durant l'essai, une petite poutre de bitume de 125 mm de long, 12,5 mm de largeur et 6,25 mm d'épaisseur est soumise à un chargement de 100 grammes (*Voir* Figure 1.13) pendant une durée normée à des températures variant de -36°C à 0°C afin de déterminer la déflexion de la poutre.

L'analyse des résultats de l'essai BBR permet d'obtenir la valeur "m" qui est la pente logarithmique de la courbe du fluage (*Voir* Figure 1.14).

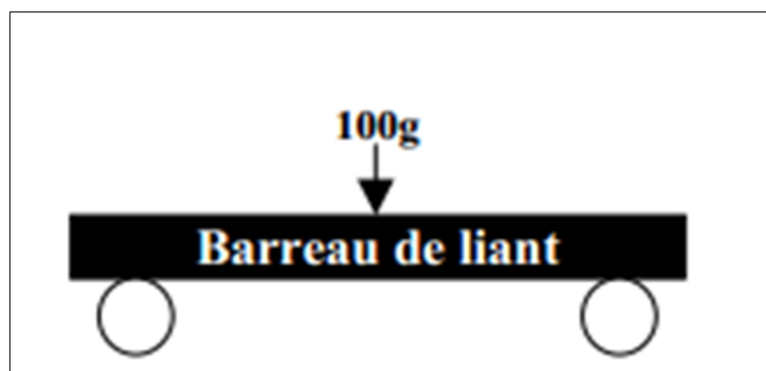


Figure 1.13 Schématisation de l'essai BBR
Tirée d'Olard (2003)

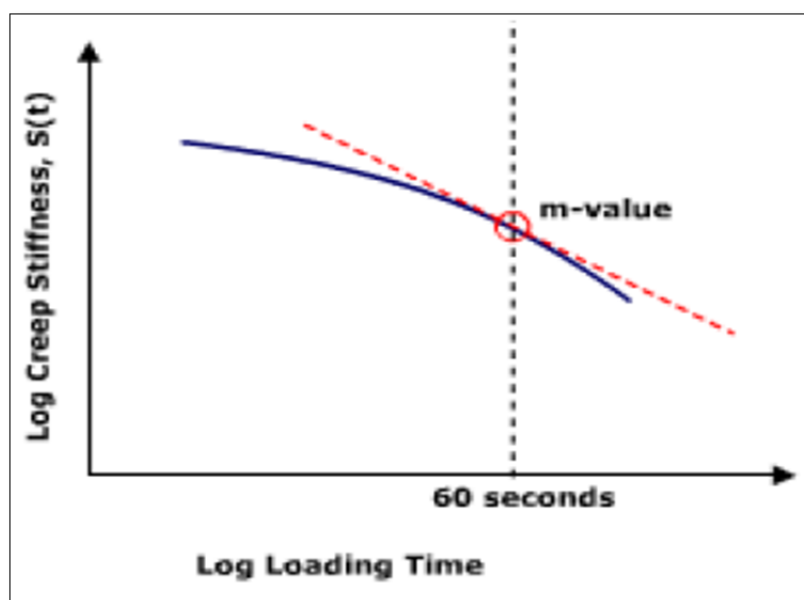


Figure 1.14 Courbe de fluage
Tirée de Bitume Québec (2008 ou 2012)

1.2.2.5 Rhéologie à hautes températures (DSR)

L'essai DSR est décrit par la norme AASHTO TP5 (Lelièvre, 2002). Il permet la mesure du module de cisaillement complexe et de l'angle de phase. L'essai consiste à placer une pastille

de bitume de 2 mm d'épaisseur (*Voir* Figure 1.15 b)) entre deux géométries plan-plan de 8 mm et d'y appliquer un cisaillement rotatif à des températures variant de 4 °C à 40 °C. Les liants bitumineux étant viscoélastiques, leur comportement varie en fonction de la température et/ou du temps de charge, passant d'un solide élastique aux basses températures et/ou fortes fréquences à un comportement de fluide visqueux à hautes températures et/ou faible temps de charge.

Le module de cisaillement complexe G^* , donnée importante, combine le module élastique G' et le module visqueux G'' du matériau par la relation $G^* = G' + i G''$.

Le rapport G'/G'' exprime la tangente de l'angle de phase φ , variant de 0° (purement élastique) à 90° (purement visqueux). φ est l'angle de phase ou déphasage entre le module élastique et le module visqueux.

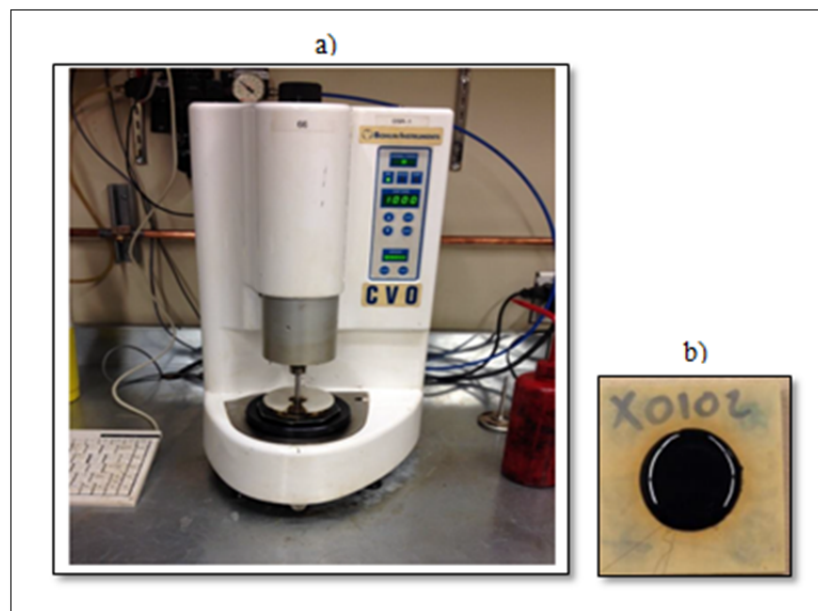


Figure 1.15 a) Rhéomètre DSR b) Pastille DSR (LCMB)

1.2.2.6 Vieillissement à court terme (RTFOT)

L'essai RTFOT simule en laboratoire le vieillissement subi par du liant bitumineux lors de la fabrication de l'enrobé à chaud dans la centrale d'enrobage. En référence à la norme américaine AASHTO T240 (Lelièvre, 2002), l'essai RTFOT contient 8 bouteilles en verre contenant chacune 35 g de bitume, disposées dans un contenant rotatif, au sein d'un four (Voir Figure 1.16). Le RTFOT se fait à haute température (163 °C) pendant 85 minutes, quel que soit le grade de bitume testé. L'essai permet d'exposer tout le bitume à la chaleur par distribution de l'air pulsé, et le mouvement continu de l'appareil permet de s'assurer qu'aucune peau ne se développe à la surface extérieure du corps d'épreuve pour le protéger.

On mesure ensuite le module de cisaillement complexe (G^*) sur le liant vieilli (Essai DSR). En effet, à haute température, le vieillissement se traduit par une augmentation de la norme du module complexe et par une diminution de son angle de phase. Il est important de mentionner que le vieillissement n'a pas beaucoup d'effet sur les propriétés VEL des bitumes à basses températures.

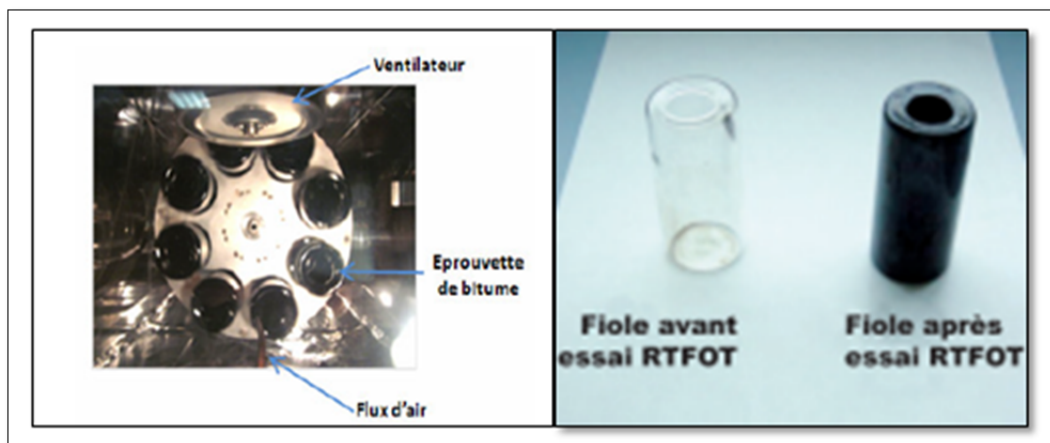


Figure 1.16 Disposition des fioles à l'intérieur de l'étuve RTFOT

1.2.2.7 Vieillissement à long terme (PAV)

L'essai PAV décrit par la norme AASHTO R28 est utilisé en laboratoire (Lelièvre, 2002) pour simuler le vieillissement sur chaussée (à long terme 8 à 9 ans).

Au cours de cet essai, le bitume (le résidu de l'essai RTFOT) est placé dans des plateaux métalliques (*Voir Figure 1.17 b*), éprouvettes d'environ 50 grammes, et est soumis à une pression de 300 psi (2070 kPa), à une température de 100 °C durant 20 heures dans le récipient. Il est classiquement réalisé après l'essai RTFOT (*Voir Figure 1.17 a*).

Après le test PAV, on mesure les propriétés conventionnelles du bitume (Rhéologie à basse température (BBR), rhéologie à haute température (DSR)). Ces valeurs dites « après PAV » seront comparées par la suite aux valeurs initiales du liant bitumineux.

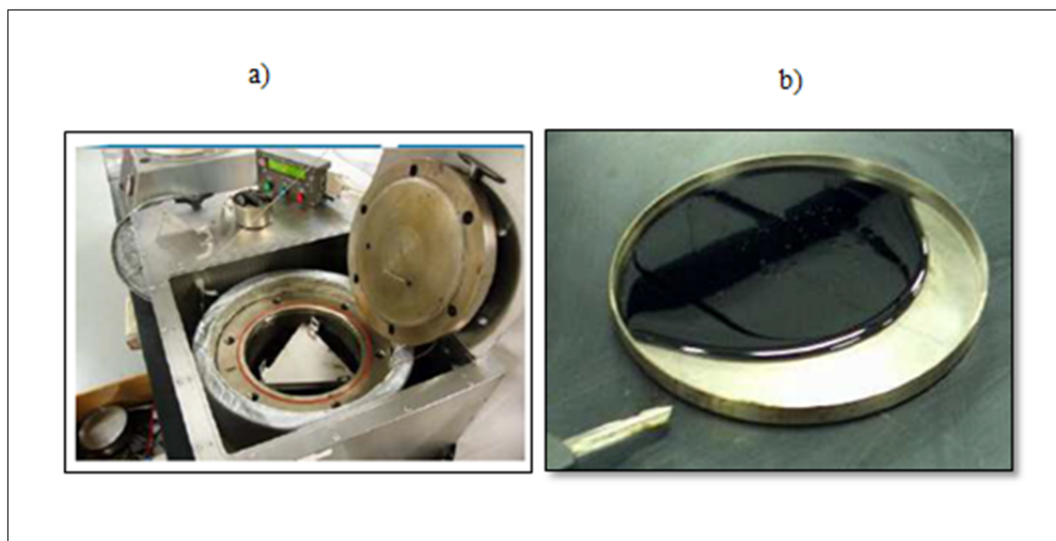


Figure 1.17 a) Schéma de principe de l'essai PAV b) éprouvette de bitume

1.3 Comportement mécanique des matériaux bitumineux dans le domaine (VEL)

1.3.1 Définition d'un corps viscoélastique

Un corps viscoélastique est un matériau dont la réaction à une contrainte donnée se comportant comme s'il était composé d'un solide élastique et d'un fluide visqueux où l'écoulement serait dépendant de certains paramètres. Ces éléments influençant l'écoulement sont :

- la température,
- la charge,
- le gradient de l'application de la charge.

Le matériau viscoélastique doit avoir une contrainte (σ) nulle à l'infini lors de l'application d'un créneau de déformation. Cette expérience est appelée effacement.

La Figure 1.18 illustre cette expérience d'effacement de contrainte qui résulte de l'application d'un créneau de déformation entre l'instant t_0 et t_1 . Le phénomène d'effacement est observable pour $t > t_1$, il peut être total ou partiel.

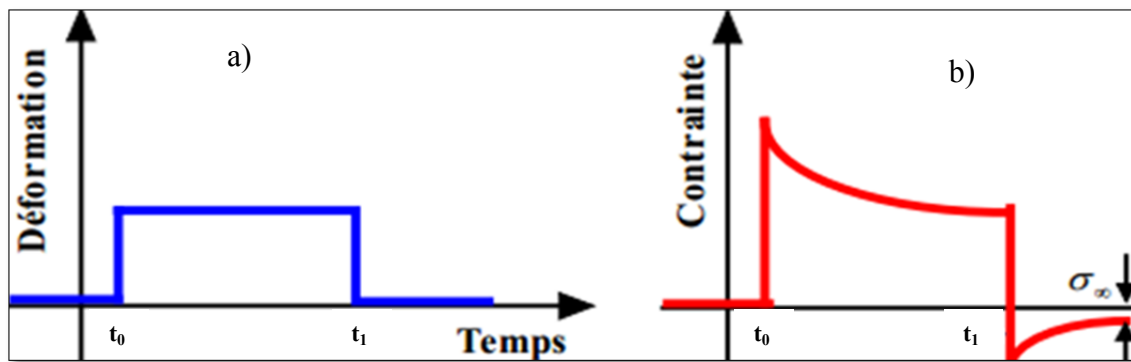


Figure 1.18 Expérience d'effacement : a) créneau de déformation
b) réponse du matériau
Adaptée d'Olard (2003)

1.3.2 Définition d'un corps viscoélastique linéaire

Un corps est dit viscoélastique linéaire si sa réaction, lors de l'application d'une sollicitation constituée de la somme des sollicitations élémentaires, est considérée comme la somme des réponses à chacune des sollicitations, ce qui se traduit par le principe de Boltzmann.

En partant de ce fait, pour un matériau VEL, la superposition des sollicitations implique la superposition homologue des réponses (Olard, 2003). Ce concept de Boltzmann est décrit par :

Tableau 1.4 Principe de superposition de Boltzmann
Tiré d'Olard (2003)

Sollicitations	Réponses
$\varepsilon_1(t)$	$\sigma_1(t)$
$\varepsilon_2(t)$	$\sigma_2(t)$
$\lambda\varepsilon_1(t) + \mu\varepsilon_2(t)$	$\lambda\sigma_1(t) + \mu\sigma_2(t) \quad \forall (\lambda, \mu) \in \mathbb{R}^2$

1.3.3 Fonction de retard (ou de fluage) et fonction de relaxation

Les hypothèses de la linéarité du comportement du matériau impliquent des conséquences immédiates sur les fonctions de retard et de relaxation définies dans la partie suivante, qui constituent autant de tests pour la validation expérimentale de la pertinence de cette hypothèse.

1.3.3.1 Fonction de retard (ou de fluage)

Le fluage est un phénomène correspondant à l'accroissement de la déformation d'un corps en fonction du temps sous l'effet de sollicitations en contrainte constante.

La fonction de fluage d'un matériau viscoélastique linéaire se détermine en imposant, à température constante, à partir d'un instant t_0 , une contrainte σ_0 (Olard, 2003). La Figure 1.19 illustre le phénomène de fluage.

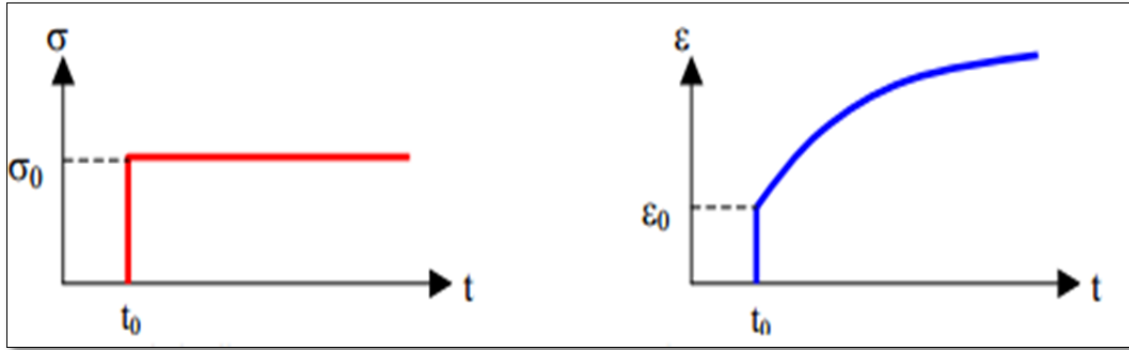


Figure 1.19 Essai de fluage –Comportement à une contrainte σ_0
Tirée d'Olard (2003)

On définit la contrainte échelon imposée par :

$$\sigma(t) = \sigma_0 H(t - t_0) \quad (1.1)$$

Avec : $H(t-t_0) = 0$ si $t-t_0 \leq 0$

$H(t-t_0) = 1$ si $t-t_0 > 0$

La réponse en déformation est :

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 J(t, t_0) \quad (1.2)$$

Avec : $J(t, t_0)$ la fonction de fluage ou de retard.

Lors de l'application d'une contrainte qui varie en fonction du temps (*Voir* Figure 1.20), la réponse à l'instant t , à l'incrément de contrainte $d\sigma(\tau)$ réalisé à l'instant τ , s'exprime sous la forme suivante :

$$d\varepsilon(t) = d\sigma(\tau) J(\tau, t) \quad (1.3)$$

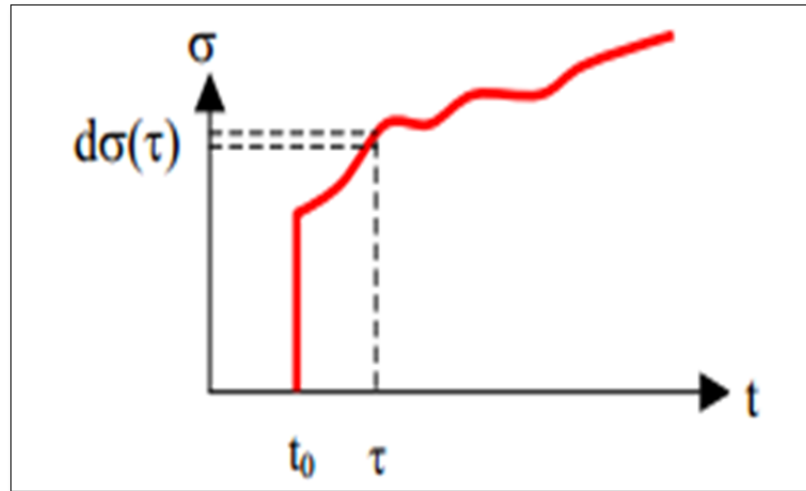


Figure 1.20 Sollicitation à contrainte variable dans le temps
Tirée d'Olard (2003)

En employant le principe de superposition de Boltzmann pour un matériau viscoélastique, la déformation $\varepsilon(t)$ est la somme des réponses à chacune des sollicitations élémentaires, on peut donc écrire (si σ est dérivable pour $\tau > t_0$) :

$$\varepsilon(t) = \int_{t_0}^t J(\tau, t) d\sigma(\tau) \text{ ou } \varepsilon(t) = \sigma(t_0)J(t_0, t) + \int_{t_0}^t J(\tau, t) d\sigma(\tau) d\tau \quad (1.4)$$

Pour un matériau non vieillissant (dont les propriétés rhéologiques restent inchangées au cours du temps), on a :

$$\varepsilon(t) = \sigma(t_0)J(t - t_0) + \int_{t_0}^t J(t - \tau) d\sigma(\tau) d\tau \quad (1.5)$$

En intégrant par partie le deuxième terme de l'équation (1.5), on obtient :

$$\varepsilon(t) = \sigma(t)J(0) + \int_{t_0}^t \sigma(t) \frac{\partial J}{\partial \tau} (\tau - t_0) d\tau \quad (1.6)$$

Le premier terme représente la réponse instantanée, alors que le deuxième terme indique la réponse différée. Selon Ferry (1980), la fonction de fluage pour un solide tend vers une limite finie quand $t \rightarrow \infty$, tandis que pour un liquide, elle croît sans limite.

1.3.3.2 Fonction de relaxation

La relaxation est la diminution des contraintes en fonction du temps d'un corps soumis à une déformation constante (*Voir* Figure 1.21). C'est une propriété non instantanée. En effet, lorsqu'on impose un échelon de déformation, en tenant compte du caractère viscoélastique du matériau, la contrainte met un certain temps pour atteindre sa valeur finale. Le matériau retourne progressivement à un état plus stable (Olard, 2003). À une température donnée et un instant t_0 , on applique une déformation échelon :

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 H(t - t_0) \quad (1.7)$$

Avec : $H(t-t_0) = 0$ si $t-t_0 \leq 0$,

$H(t-t_0) = 1$ si $t-t_0 > 0$.

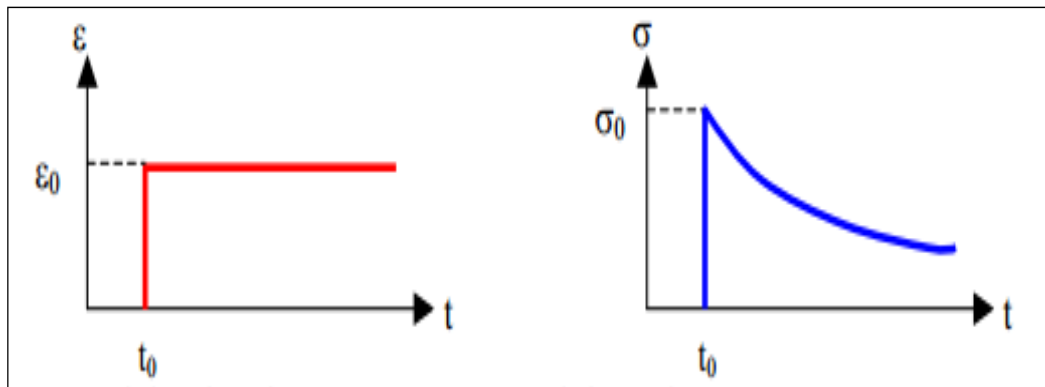


Figure 1.21 Essai de relaxation – Comportement à déformation constante
Tirée d'Olard (2003)

Ainsi la réponse de la contrainte est définie par :

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 R(t_0, t) \quad (1.8)$$

Avec : $R(t_0, t)$ fonction de relaxation.

En prenant en considération l'hypothèse de matériau non-vieillissant, pour une déformation qui varie dans le temps, à température constante, la contrainte peut s'exprimer comme suit :

$$\sigma(t) = \varepsilon(t)R(0) + \int_{t_0}^t \varepsilon(t) \frac{\partial R}{\partial \tau} (\tau - t_0) d\tau \quad (1.9)$$

Le premier terme indique la réponse instantanée, tandis que le deuxième terme donne la réponse différée (Olard, 2003).

1.3.4 Module de Young complexe (E^*) et module de cisaillement complexe (G^*)

Le comportement peut être décrit par le calcul expérimental et la représentation graphique de l'évolution du module complexe. Afin d'étudier le comportement du matériau, un signal de chargement sinusoïdal de fréquence (f_r) et de pulsation ($\omega=2\pi f_r$) est utilisé. Physiquement, le module de Young complexe (E^*), exprimé en module par $|E^*|$ (aussi appelé module dynamique aux USA et au QC), est considéré comme le rapport des amplitudes de la contrainte sinusoïdale (σ) appliquée et de la déformation (ε) correspondante (ou réciproquement), et en argument (φ), le déphasage qui existe entre la contrainte et la déformation (Olard, 2003).

En écriture complexe, le module complexe est défini par l'équation suivante :

$$E^* = \frac{\sigma^*}{\varepsilon^*} = \frac{\sigma_0 e^{i\omega t}}{\varepsilon_0 e^{i(\omega t - \varphi_E)}} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} e^{i\varphi_E} \quad (1.10)$$

Il peut s'écrire également sous la forme suivante :

$$E^* = E_1 + iE_2 \text{ ou } E^* = E_0 e^{i\varphi_E} \text{ ou } E^* = E_0 (\cos\varphi_E + i\sin\varphi_E) \quad (1.11)$$

Avec :

- i : nombre complexe dont le carré vaut (-1) ,
- E_1 : partie réelle, parfois appelée le module d'élasticité,
- E_2 : module de perte,
- E_0 : module (ou norme) de E^* ,
- φ_E : angle de déphasage entre la contrainte et la déformation.

Dans le cas où la contrainte est un cisaillement $\tau(t) = \tau_0 \sin(\omega t)$ et la déformation est une distorsion $\gamma(t) = \gamma_0 \sin(\omega t - \varphi_E)$, on parle donc de module de cisaillement complexe G^* qui est défini de la même manière que E^* par :

$$G^* = \frac{\tau_0 e^{i\omega t}}{\gamma_0 e^{i(\omega t - \varphi_G)}} = \frac{\tau_0}{\gamma_0} e^{i\varphi_G} = G_1 + iG_2 \quad (1.12)$$

Si le comportement du matériau est considéré comme VEL isotrope, la relation entre le module complexe E^* et le module complexe de cisaillement G^* est la suivante :

$$G^* = \frac{E^*}{2(1 + \nu^*)} \quad (1.13)$$

Avec : ν^* est le coefficient de Poisson complexe.

1.3.5 Principe d'équivalence temps-température

Les modules complexes E ou G^* peuvent être exprimés en fonction de deux variables indépendantes : fréquence f_r (ou pulsation ω) et température θ . Le résultat des représentations graphiques des courbes isothermes indique qu'on peut obtenir la même valeur de module pour plusieurs couples (pulsation, température), ce qui se traduit par l'équation suivante :

$$E^*(\omega_1, T_1) = E^*(\omega_2, T_2) \text{ avec } (\omega_1, T_1) \neq (\omega_2, T_2) \quad (1.14)$$

Ce concept est appelé principe d'équivalence temps-température (PETT) ou principe de superposition temps-température (PSTT).

Huet (1963) a remarqué, qu'en transposant les composantes du module complexe dans le plan complexe (E_1, E_2), appelé aussi Plan Cole-Cole, ou dans l'Espace de Black (plan $\varphi_E, \log|E^*|$) (Voir Figure 1.22a)) que les points significatifs s'ajustent en première approximation sur une seule et unique courbe qui n'est dépendante ni de la température, ni de la fréquence.

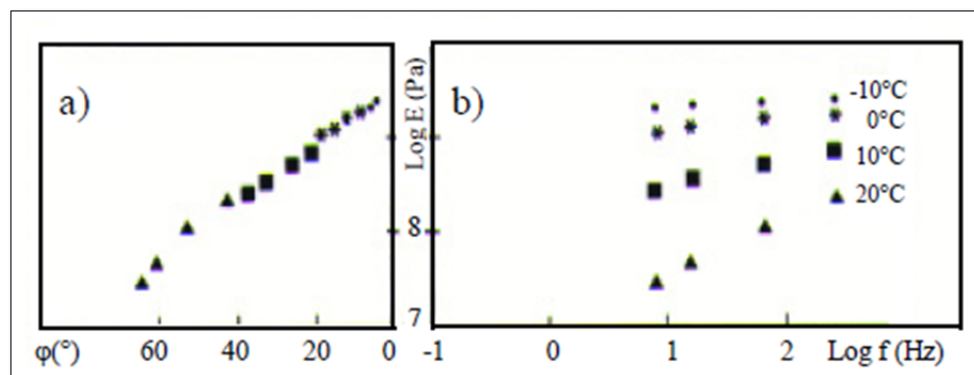


Figure 1.22 a) Exemple de courbe de module complexe dans l'espace de Black d'un bitume b) Isothermes du même bitume pur
Tirée d'Olard (2003)

Cette constatation conduit à considérer que pour les bitumes purs et en première approximation l'existence d'une équivalence entre la température et la fréquence. En partant de cette conséquence, la courbe module peut être influencée par une seule variable « g » fonction de la température et de la fréquence. On considère alors, comme première approximation, que le bitume pur est un corps thermorhéologiquement simple et s'exprime selon l'équation suivante :

$$E^*(\omega, T) = E^*[g(\omega, T)] \quad (1.15)$$

La représentation graphique des isothermes de $|E^*|$ en fonction de la fréquence en base logarithmique, pour un matériau thermorhéologiquement simple, permet d'obtenir une courbe unique, appelée "courbe maîtresse", qui se confond avec une isotherme T_s (ou encore notée T_R) choisie comme référence en translatant les isothermes le long de l'axe des fréquences. La Figure 1.23 présente une courbe maîtresse obtenue à $T_s=10^\circ\text{C}$ pour un enrobé au bitume pur.

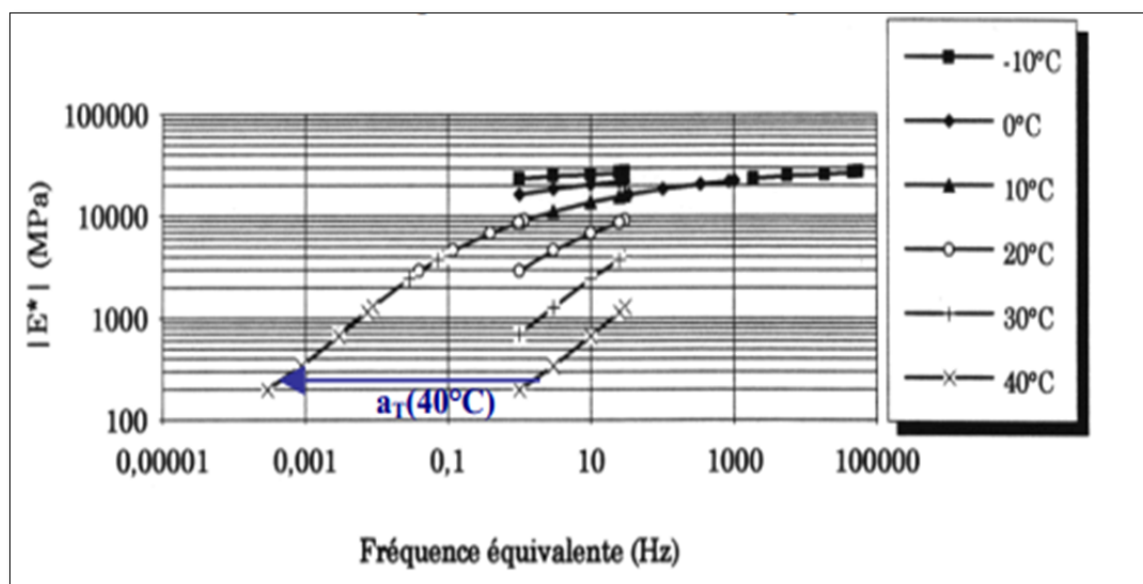


Figure 1.23 Exemple d'isothermes et de courbe de maitresse à 10°C d'un enrobé fabriqué à partir d'un bitume pur
Tirée de Di Benedetto et de la Roche (1998)

La fonction devient donc :

$$g(\omega, T) = \omega \tau(T) \quad (1.16)$$

où τ dépend de la température T et est appelée temps de relaxation. Cette fonction peut être exprimée de la forme suivante :

$$\tau(T) = \tau_0 a_T \quad (1.17)$$

Avec a_T : le facteur de translation. Il est égal à 1 à la température de référence choisie T_s .

Les différentes formes d'évolution d' a_T ont été étudiées dans la littérature. Huet (1963) a employé la loi d'Arrhenius qui prend la forme suivante :

$$\log(a_T) = \frac{\Delta H}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_s} \right) \quad (1.18)$$

Avec : ΔH l'énergie d'activation de relaxation et R la constante des gaz parfaits.

Une autre forme d' a_T souvent sollicitée est celle établie expérimentalement par William, Landel et Ferry (W.L.F) (Ferry, 1980) pour une famille de polymères. Elle s'exprime de la manière suivante :

$$\log(a_T) = \frac{-C_1(T - T_s)}{C_2 + (T - T_s)} \quad (1.19)$$

Où C_1 et C_2 sont des constantes du matériau qui varient avec la température de référence T_s .

1.3.6 Relation entre le comportement VEL du liant et celui de l'enrobé

Le problème de prédiction du module de Young complexe des EB n'est pas récent et reste toujours d'actualité à cause de sa complexité. Malgré la disponibilité des études des chercheurs qui se sont intéressés à la prédiction du module de Young complexe et qui ont

proposé différents modèles empiriques, ces modèles prévisionnels font face à certaines difficultés (Heukelom et Klomp, 1964; Boutin et al, 1995; Francken et Vanelstraete, 1995; Di Benedetto et Des Croix, 1996; Boussad et Des Croix, 1997; Marasteanu, 1999; Zeng et al, 2001).

En effet, la plupart des modèles prévisionnels repose sur une interprétation empirique des résultats expérimentaux, en absence d'une connaissance approfondie et exhaustive de la mécanique structurelle des matériaux enrobés (Francken, 1977). Il est à mentionner qu'il existe une multitude de modèles pour décrire le comportement linéaire des enrobés. Dans le présent manuscrit, nous détaillerons (4) modèles qui nous ont apparus les plus complets et qui nécessitent la connaissance du module de rigidité du liant.

1.3.6.1 Méthode de Heukelom et Klomp

Les études de Klomp et Heukelom ont permis d'exprimer le module dynamique d'un enrobé sous la forme suivante (Heukelon et Klomp, 1964) :

$$|E^*| = S_b \left(1 + \frac{2,5}{n} \times \frac{C_v}{1 - C_v} \right)^n \quad (1.20)$$

Où :

- $n = 0,83 \times \log\left(\frac{4 \times 10^4}{S_b}\right)$
- S_b est le module de rigidité du bitume tiré de l'abaque de Van der Poel qui donne le module de rigidité d'un bitume en fonction de la fréquence, de la température et de l'indice de pénétration (IP) du liant;
- $C_v = \frac{g}{g+b}$, avec g et b sont respectivement la fraction volumique des granulats et celle du bitume (%).

Cette équation citée ci-dessus contribue à pronostiquer les modules d'une très grande variété de compositions lorsque la teneur en vides de l'enrobé est autour de 3%. Si la teneur en vides

de l'enrobé dépasse 3%, ce qui est généralement le cas, la concentration volumique C_v est modifiée par une valeur corrigée en fonction du pourcentage de vides C'_v :

$$C'_v = \frac{C_v}{0,97 + 0,01 \times (100 - (g + b))} \quad (1.21)$$

1.3.6.2 Méthode d'Ugé et al

La méthode d'Ugé et al (1977) permet de déterminer le module dynamique et l'angle de phase du module de Young complexe de l'enrobé à partir des caractéristiques du liant et de la composition de l'enrobé.

- Si $10^7 \text{Pa} < S_b < 10^9 \text{Pa}$

$$\log|E_{enrobé}^*| = M(\log(S_b) - 8) + B \quad (1.22)$$

- Si $10^9 \text{Pa} < S_b < 3.10^9 \text{Pa}$

$$\log|E_{enrobé}^*| = B + M + (A - B - M) \frac{\log(S_b) - 9}{\log(3)} \quad (1.23)$$

Avec :

- $A = 10,82 - 1,342 \frac{(100-g)}{g+b}$
- $B = 8 + (6,68 \times 10^{-3} \times g) + (2,135 \times 10^4 \times g^2)$
- $M = \frac{1,12(A-B)}{\log(30)}$
- S_b est le module de rigidité du bitume

Ugé et al. (1977) ont établi également une expression empirique de l'angle de phase du module dynamique de l'enrobé qui dépend du module de rigidité du liant S_b , de la teneur en vides ($v(\%)$) et de la fraction volumique du bitume ($b(\%)$). Pour $5 \text{ MPa} < S_b < 2000 \text{ MPa}$, l'angle de phase de l'enrobé peut être déterminé selon l'équation suivante :

$$\varphi_{\text{enrobé}} = 16,36 \times (b^{0,352}) \times \exp\left(0,974 \times \frac{\log(\frac{S_b}{5})}{\log(\frac{S_b}{2000})} \times v^{-0,172}\right) \quad (1.24)$$

Il est important de mentionner que si S_b est supérieur à 2000 MPa, $\varphi_{\text{enrobé}}$ est supposé nul.

1.3.6.3 Relation de Francken et coll.

Il a été démontré par Francken et coll. (1995) que le module maximum asymptotique (E_∞) de l'enrobé, à basse température et/ou à haute fréquence, ne dépend que de la composition de l'enrobé bitumineux :

$$E_\infty = 14360 \times \left(\frac{g}{b}\right)^{0,55} \times \exp(-0,584v) \quad (1.25)$$

La norme du module complexe de l'enrobé peut être décomposée selon la forme suivante :

$$R^*(T, f) = \frac{E_{\text{enrobé}}^*(T, f)}{E_\infty} \quad (1.26)$$

$$\log R^* = \log B^* \left(1 - 1,35 \left(1 - \exp\left(-0,13 \frac{g}{b}\right)\right) (1 + 1,11 \log B^*)\right) \quad (1.27)$$

Avec :

- $R^*(T, f_r)$: module réduit de l'enrobé à la température T et la fréquence f_r ;
- B^* : module réduit du bitume défini à partir du module en cisaillement du bitume.

Francken et Vanelstraete (1995) ont présenté une relation expérimentale entre l'angle de phase de l'enrobé bitumineux et celui du liant en fournissant l'abaque ci-dessous.

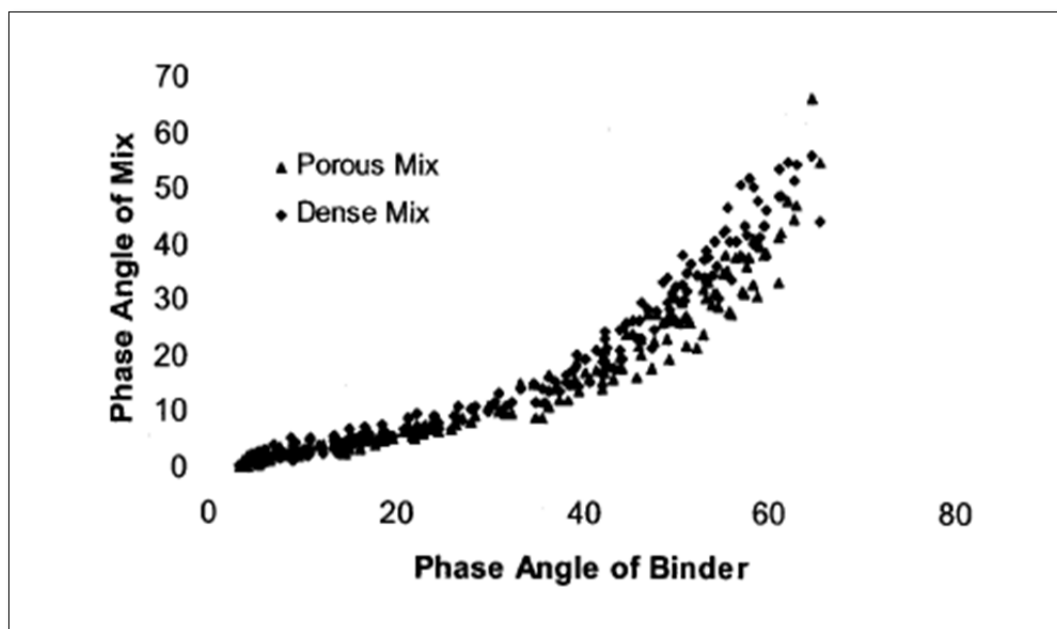


Figure 1.24 Relation entre l'angle de phase des enrobés et celui des liants
Tirée d'Olard (2003)

1.3.6.4 Transformation géométrique de Di Benedetto et coll.

Les méthodes de détermination des modèles de prédiction des modules complexes de l'enrobé à partir de celui du liant (présentées ci-dessus) sont choisies de la littérature parmi tant d'autres. Cependant, ces modèles, comme on l'a précisé auparavant, présentent des simplifications qui n'expliquent pas la caractérisation du comportement viscoélastique linéaire (module complexe) car ils se sont formulés en s'appuyant sur plusieurs simplifications telles que :

- l'angle de phase n'est pas toujours pris en compte;
- les modèles sont valides sur des gammes de fréquences et de températures restreintes.

Di Benedetto et coll. ont fourni un modèle qui permet de franchir ces barrières. Le module de Young complexe de l'enrobé est déterminé à partir de celui du liant par la relation de l'équation suivante (Di Benedetto et al., 2004) :

$$E_{enrobé}^*(\omega, T) = E_{00enrobé} + (E_{liant}^*(10^\alpha \omega, T) - E_{00liant}) \left(\frac{E_{0enrobé} - E_{00enrobé}}{E_{0liant} - E_{00liant}} \right) \quad (1.28)$$

Si le module de Young complexe du liant est connu à une température T et une pulsation ω , l'équation (1.28) permet d'obtenir le module de Young de l'enrobé au même couple température-fréquence. Il faut connaître seulement 3 paramètres: $E_{0enrobé}$, $E_{00enrobé}$ et α .

$E_{00enrobé}$ et $E_{0enrobé}$ ont une signification physique. $E_{00enrobé}$ représente la valeur asymptote du module complexe de l'enrobé quand la fréquence tend vers 0 (valeur minimale de la norme du module complexe). $E_{0enrobé}$ définit le module infini, c'est-à-dire lorsque la fréquence tend vers l'infini (valeur maximale de la norme du module complexe). Tandis que la troisième constante α dépend de la formulation de l'enrobé et/ou du vieillissement du matériau pendant la fabrication. Ce paramètre lie le temps de relaxation de l'enrobé à celui du liant à l'aide la relation suivante :

$$\tau_{enrobé} = 10^\alpha \tau_{liant} \quad (1.29)$$

Si on se base sur le module de Young complexe du liant ($E_{liant}^*(\omega, T)$), à la température T et la pulsation ω , on obtient le module complexe de l'enrobé bitumineux ($E_{enrobé}^*(10^{-\alpha}\omega, T)$) à la température T et la pulsation $10^{-\alpha}\omega$ par (3) transformations géométriques consécutives dans le plan de Cole-Cole qui sont (*Voir* Figure 1.25) :

- une translation négative de valeur $E_{00liant}$ suivant l'axe des réels. Cette valeur est égale à 0 ou quasi nulle pour la plupart des liants bitumineux;
- une homothétie de rapport $(E_{0enrobé} - E_{00enrobé} / E_{0liant} - E_{00liant})$ à partir de l'origine;
- une translation positive de valeur $E_{00enrobé}$ suivant l'axe des réels.

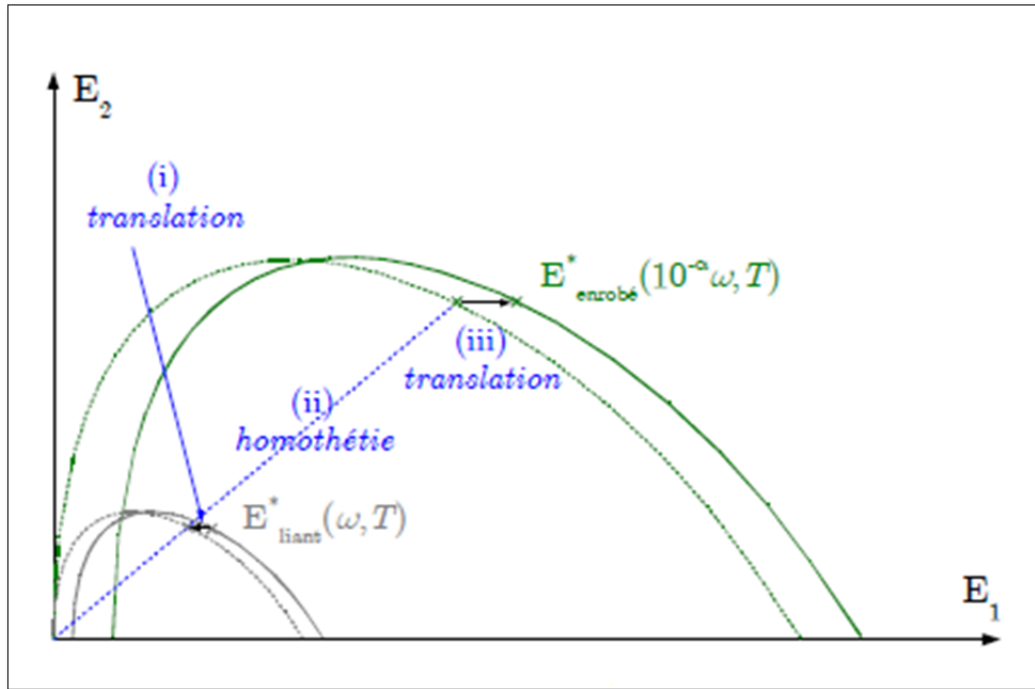


Figure 1.25 Prédiction du module complexe de l'enrobé à partir de celui du liant dans le plan Cole-Cole
Tirée de Di Benedetto et al (2004)

1.4 Modélisation du comportement VEL des matériaux bitumineux par des assemblages à spectre continu

Dans cette partie, nous présentons les différents modèles rhéologiques considérant un spectre continu pour la modélisation des matériaux bitumineux en petites déformations (domaine viscoélastique linéaire VEL). En effet, les approches considérant un spectre continu les plus répandus dans la littérature sont : le modèle de Huet, le modèle de Huet-Sayegh et le modèle 2S2P1D (2 Springs, 2 Parabolic, 1 Dashpot).

1.4.1 Modèle de Huet

Le modèle de Huet (Huet, 1963) est un modèle analogique de (4) paramètres, constitué d'un assemblage monté en série d'un ressort de raideur E_∞ et de deux amortisseurs à fluage

parabolique de paramètres h et k (Voir Figure 1.26). À noter qu'un élément parabolique de paramètre β est un modèle analogique qui possède une fonction de fluage de type parabolique s'écrivant selon l'équation suivante :

$$J(t) = a \left(\frac{t}{\tau} \right)^\theta \quad (1.30)$$

Avec :

- a : constante sans dimension,
- τ : temps caractéristique dont la valeur varie en fonction de la température,
- θ : nombre tel que $0 < \theta < 1$.

Le module complexe qui correspond à cet élément parabolique est exprimé comme suit :

$$E^*(i\omega\tau) = \frac{(i\omega\tau)^\theta}{a\Gamma(h+1)} \quad (1.31)$$

Avec :

- Γ : fonction d'Euler de deuxième espèce définie par l'équation $\Gamma(n) = \int_0^\infty t^{n-1} e^{-t} dt$ ($n > 0$);
- i : nombre complexe tel que $i^2 = -1$.

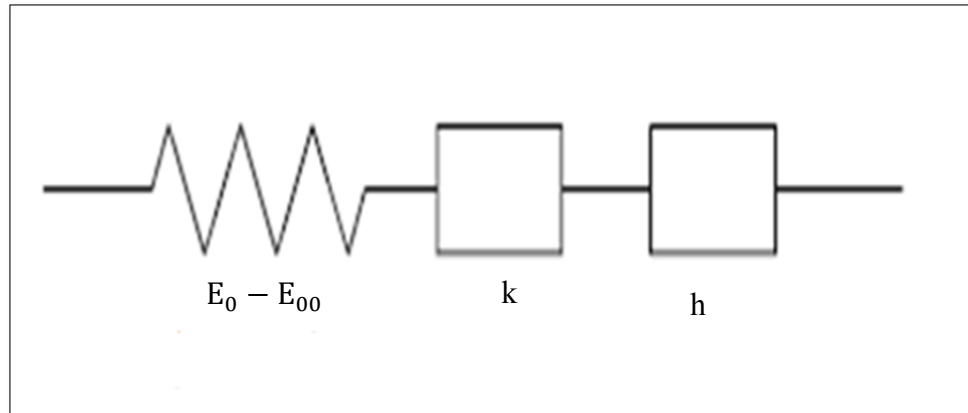


Figure 1.26 Représentation du modèle de Huet
Tirée de Huet (1963)

Le module complexe E^* de ce système s'exprime en fonction des paramètres du modèle comme suit :

$$E^*(\omega) = \frac{E_0}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h}} \quad (1.32)$$

k, **h** et **δ** sont les paramètres des éléments paraboliques du modèle qui vérifient $0 < k < h < 1$ dans le cas des matériaux bitumineux. E_0 est le module instantané du modèle quand $\omega\tau$ tend vers l'infini (fréquences élevées et/ou basses températures).

1.4.2 Modèle de Huet-Sayegh

Sayegh a amélioré le modèle d'Huet en 1965 car il n'était pas efficace aux basses fréquences. Ce dernier a ajouté en parallèle, au modèle de Huet, un ressort de rigidité E_{00} (négligeable devant E_0). La Figure 1.27 représente les éléments constituant le modèle de Huet-Sayegh.

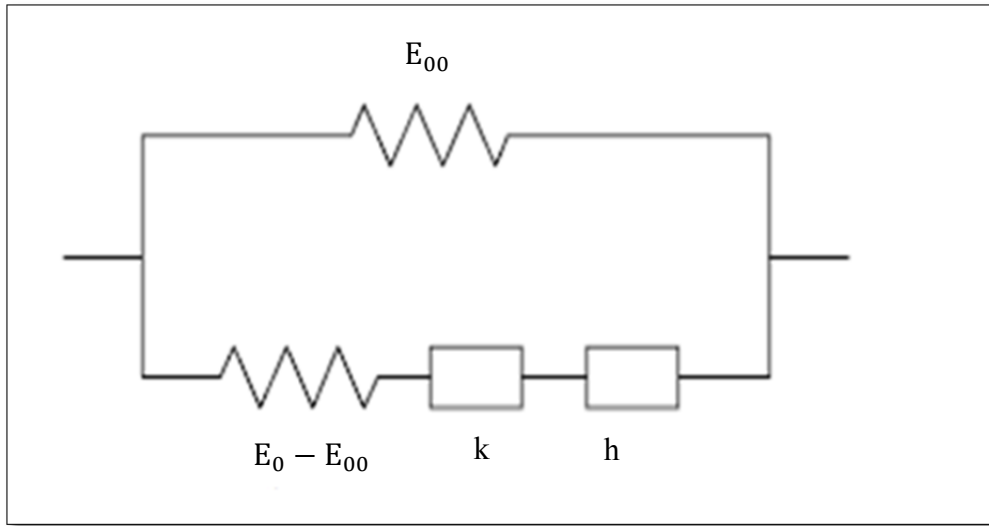


Figure 1.27 Représentation du modèle de Huet-Sayegh
Tirée de Sayegh (1965)

Le module complexe E^* de ce système s'exprime en fonction des paramètres du modèle sous la forme suivante :

$$E^*(\omega) = E_{00} + \frac{E_0 - E_{00}}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h}} \quad (1.33)$$

Avec les mêmes éléments que précédemment. E_{00} est le module statique.

Il est important de mentionner que le modèle de Huet-Sayegh est un modèle analogique permettant de représenter convenablement le comportement des enrobés bitumineux sur une large gamme de températures et de fréquences (Sayegh, 1965 et Olard, 2003).

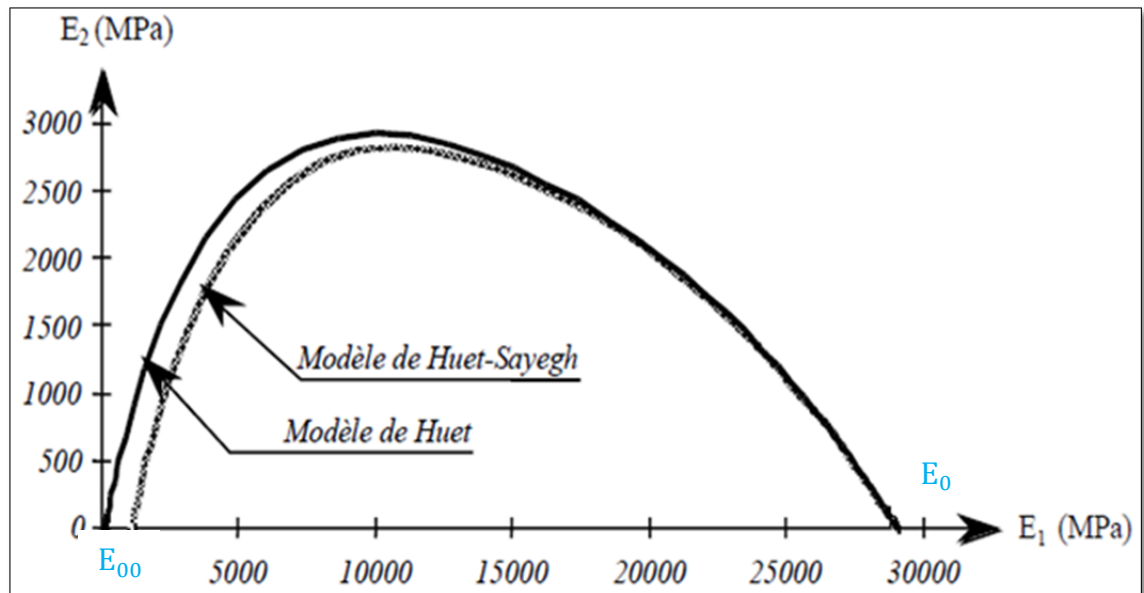


Figure 1.28 Exemple de courbes de module complexe des modèles Huet et Huet-Sayegh dans le plan Cole-Cole
Tirée d'Olard (2003)

1.4.3 Modèle 2S2P1D (2 Springs, 2 Parabolic, 1 Dashpot)

Ce modèle a été introduit par Olard et Di Benedetto (Olard, 2003 ; Olard et Di Benedetto 2003) afin de représenter le comportement des bitumes, des mastics et des enrobés bitumineux dans le domaine VEL. Ce dernier est appelé 2S2P1D car il comporte : «2 Springs» (ressorts), «2 Parabolic» (éléments paraboliques) et «1 Linear Dashpot» (amortisseur) (Lamothe, 2014). En effet, les deux chercheurs ont généralisé le modèle Huet-Sayegh en ajoutant un amortisseur linéaire en série avec les éléments paraboliques pour tenir en compte du comportement newtonien des bitumes purs à hautes températures (basses fréquences). La Figure 1.29 illustre ce modèle.

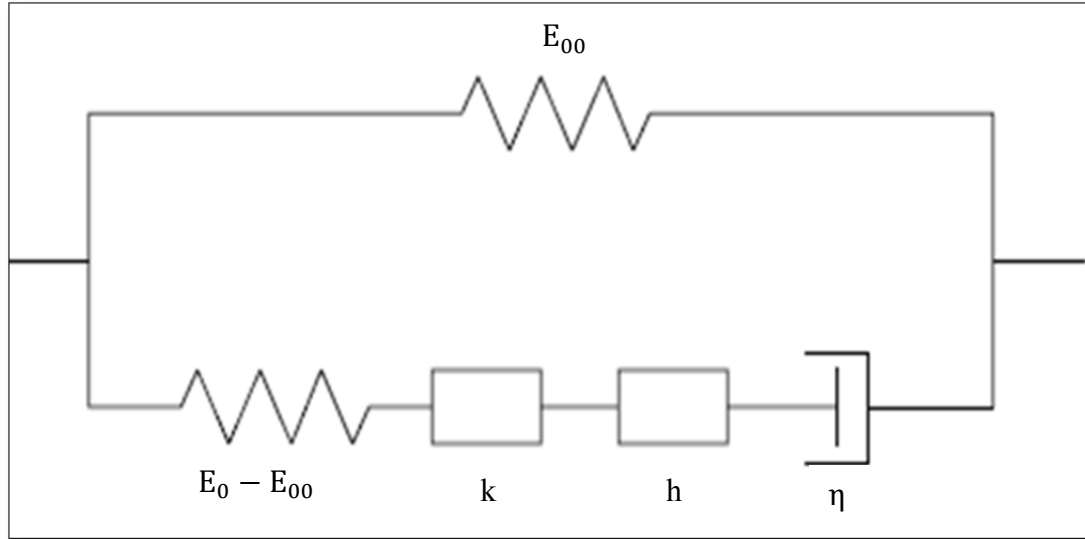


Figure 1.29 Représentation du modèle 2S2P1D
Tirée d'Olard et Di Benedetto (2003)

Par ailleurs, le module complexe du modèle 2S2P1D s'exprime sous la forme suivante :

$$E^*(\omega) = E_{00} + \frac{E_0 - E_{00}}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h} + (i\omega\beta\tau)^{-1}} \quad (1.34)$$

Avec les mêmes notations que précédemment.

$\beta = (E_0 - E_{00})\eta\tau$ est une constante sans dimensions et η est la viscosité newtonienne.

1.5 Propriétés rhéologiques des mastics bitumineux

1.5.1 Définitions et généralités

Le mastic bitumineux est un mélange de liant bitumineux et de fillers (ou de fines). Les fillers ont été définis précédemment comme étant des petites particules de granulats passant au tamis 315 μm . Le mastic joue un rôle prépondérant dans les enrobés : il est le « réel » et véritable liant entre les grosses particules dans l'enrobé bitumineux. La maîtrise des propriétés thermomécaniques des mastics bitumineux semble donc indispensable car ce

dernier a un impact significatif sur les propriétés physiques des enrobés (résistance aux déformations permanentes, contrainte de rupture aux basses températures, modules complexes, résistance à l'eau) (Lesueur et al, 1998 ou 1999). D'autre part, le filler permet de remplir une partie des vides laissée par les granulats de taille supérieure, ce qui complète la granulométrie. Ainsi, le filler joue également un rôle important dans la formulation des enrobés. La différence entre la taille des particules d'asphaltènes (inférieures à 30 nm) et celle des fines minérales (quelques microns) nous permet de considérer le filler comme une suspension. Il est à mentionner que les lois de suspensions connues ne peuvent plus s'appliquer pour les mastics dans le cas particulier des fillers « actifs » ayant une interaction chimique plus ou moins grande avec certains bitumes. En effet, les fillers actifs comme la chaux hydratée ne se comportent pas comme de simples charges mais agissent de manière à modifier l'équilibre colloïdal du bitume. Une connaissance approfondie des propriétés des mastics et de l'interaction bitume-filler paraît importante. De nombreux chercheurs se sont intéressés à l'étude du comportement du mastic. Anderson et Goetz (Anderson et Goetz, 1973) ont présenté une des premières études sur le comportement mécanique des mastics, en montrant que leur rigidité dépend de la taille des fillers, de la température et des interactions entre le bitume et les fillers. Ils expliquent que le mastic peut être traité de manière thermorhéologique comme des matériaux viscoélastiques linéaires car il vérifie le principe d'équivalence temps-température au même titre que le liant qui le constitue.

Plusieurs études ont montré que le volume et la composition du mastic (fillers et bitume) sont des facteurs déterminants pour le comportement mécanique des enrobés bitumineux. Il est intéressant d'étudier ces constituants séparément afin d'évaluer l'effet des fillers sur le mastic bitumineux et analyser l'interaction fillers-bitume.

1.5.2 Propriétés rhéologiques des mastics bitumineux

Les fillers ont une grande importance concernant la formulation de l'enrobé même s'ils forment qu'une portion relativement faible des constituants. Il semble donc judicieux d'étudier certains paramètres qui permettront de comprendre le comportement rhéologique

des mastics. Les facteurs influents qui sont souvent étudiés dans la littérature sont (Olard, 2003) :

- la masse volumique des grains,
- la taille des grains (surface spécifique des fines),
- le pourcentage de vides des fines,
- la nature des fines,
- la concentration massique ou volumique fines/bitumes,
- la forme des grains,
- l'angularité.

1.5.2.1 Caractéristiques physiques des fillers

On détermine **la masse volumique** des fines par la méthode de pesées relatives avec immersion dans un solvant dans un pycnomètre. Tandis que **la teneur en vides** du filler compacté (sans prendre en compte les vides inclus dans les grains) se mesure par la méthode de Rigden (1947). Cet essai consiste à placer une quantité de fines dans un cylindre de dimension définie. Après compactage, on mesure la hauteur de la prise d'essai dans le cylindre et connaissant la masse volumique absolue des fines, on déduit le volume des vides intergranulaires. L'indice des vides de Rigden est alors défini comme le rapport des vides intergranulaires sur le volume occupé par les fines dans le cylindre. Cet essai s'applique aussi bien sur les particules fines naturelles qu'artificielles. La teneur en vides des fines est généralement comprise entre 30 et 45%.

Anderson et Goetz étaient les premiers à affirmer que **la taille des fine** a une influence sur la rigidité des mastics et, par conséquent, sur leur comportement mécanique (Van Rompu et Di Benedetto, 2006). Chen et Peng (1998) ont remarqué que la résistance à la traction du mastic augmente si la taille des fines diminue : à volume équivalent, plus les particules sont petites, plus leur surface spécifique est grande et les interactions bitume/fines sont donc d'autant plus fortes (*Voir Figure 1.30*).

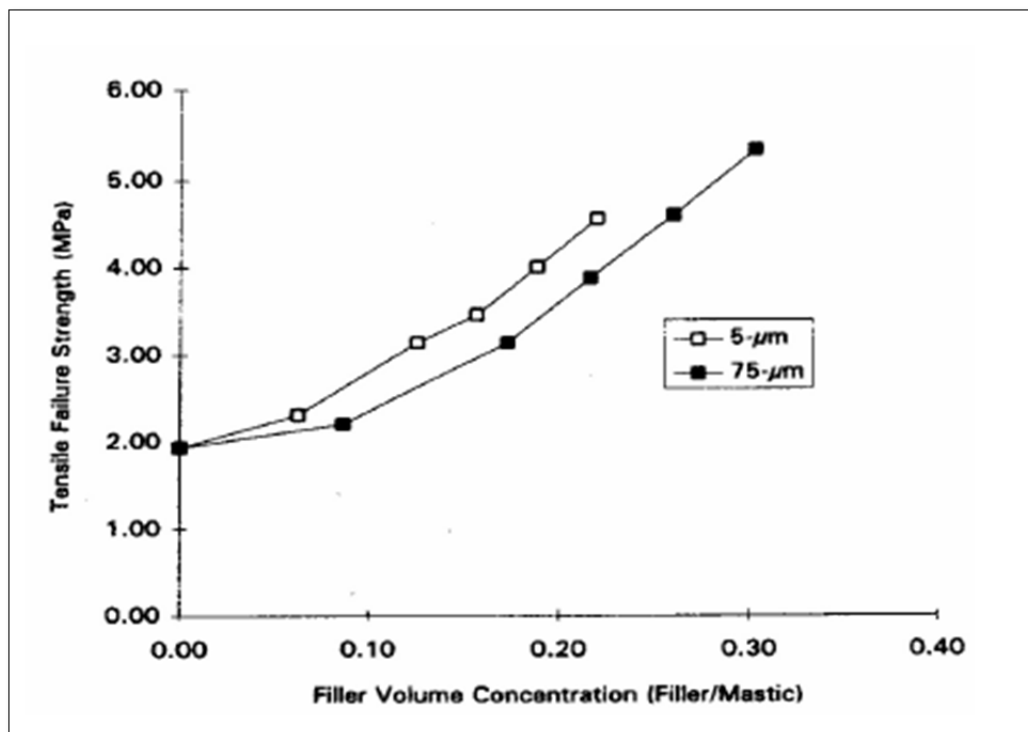


Figure 1.30 Influence de la taille des fines sur la contrainte de rupture du mastic
Tirée de Van Rompu (2006)

À noter que **la surface spécifique des particules** fines permet de déterminer le dosage optimum de liant pour que l'enrobage soit complet et que le film de liant ne soit pas trop épais, ce qui peut engendrer un risque de ressuage. La méthode de Blaine est utilisée pour sa détermination. Cette méthode consiste à mesurer le temps mis par un volume d'air donné pour traverser un échantillon de filler compacté. La surface spécifique des grains de filler est généralement supérieure à $1000 \text{ m}^2/\text{kg}$.

1.5.2.2 Nature des fines

En Amérique du nord, peu d'essais sont utilisés pour caractériser les fines. Par contre, en Europe, plusieurs essais sont employés pour analyser les fines et les fillers d'apport dans les enrobés bitumineux. Dans le cadre de cette étude, il est donc apparu intéressant de faire un état d'art sur les recherches déjà réalisées sur ce sujet.

Les fines servent, non seulement, à combler les vides à la place du bitume, mais elles contribuent également à améliorer la résistance à la traction et à l'orniérage des enrobés bitumineux. Cependant, pour bien remplir ce rôle, les fines doivent avoir de bonnes caractéristiques et plus précisément, la nature chimique de celles-ci afin de garantir une adhésivité adéquate entre les fines et le bitume. En effet, l'utilisation de fillers actifs (fillers ayant une interaction chimique plus ou moins grande avec certains bitumes) améliore le comportement du mastic et donc de l'enrobé. Par contre, les fillers dits inertes n'ont aucune interaction avec le bitume (Olard, 2003).

À titre d'exemple, citons le filler de chaux hydratée qui est considéré comme le filler actif le plus couramment étudié. En effet, selon Lesueur et coll.(1999), une couche adsorbée de bitume se développe autour des particules de chaux hydratée de volume assez substantiel, d'où la bonne adhésivité à l'interface : grain de chaux hydratée / bitume. Sainton et coll. (1999) ont montré que le filler de chaux hydratée réagit simultanément avec le bitume et les granulats tout en modifiant le comportement de l'enrobé bitumineux. Ceci se traduit par (Olard, 2003) :

- une résistance à l'orniérage accrue,
- une amélioration de la tenue au désenrobage,
- une grande souplesse et ténacité à basse température,
- une augmentation de la cohésion du mastic,
- une bonne résistance au vieillissement.

D'autres rapports ont été publiés par « l'Asphalt Institute » sur les fines dans les enrobés bitumineux. Les chercheurs ont conclu, à partir des études réalisées sur les fines de calcaires, de Kaolin, de terre de foulon (argile) et de fibre d'amiante courte que ces particules modifient les propriétés du bitume telles que la pénétration, la viscosité, la ductilité et les propriétés des enrobés ainsi que la résistance au désenrobage et la compactibilité. Les études ont également montré que les propriétés des fines ont un effet prononcé sur la durabilité des enrobés qui subissent une longue immersion dans l'eau.

1.5.2.3 Effet de la teneur en fillers sur le comportement du mastic

La teneur en fines semble le paramètre le plus important à étudier afin d'obtenir des performances idéales du liant bitumineux car les propriétés du mastic dépendent beaucoup de la quantité de fines introduite dans le bitume. En effet, en augmentant la teneur en fines jusqu'à des rapports « volumes fines / bitume » de 75 %, on augmente les caractéristiques suivantes (Olard, 2003) :

- la consistance, puisque la pénétrabilité à 25 °C diminue;
- la viscosité;
- la rigidité;
- les propriétés élastiques à haute température;
- le point de ramollissement Bille et Anneau.

À noter que les (3) dernières propriétés entraînent un meilleur comportement de l'enrobé dans la chaussée vis-à-vis de l'orniérage à haute température (Olard, 2003).

Soenen et Teugels (1999) ont constaté que le renforcement du bitume par les fines dépend essentiellement de leur teneur volumique dans le mastic bitumineux. En effet, pour les fortes concentrations en fines (supérieures à 45 % volumique), le squelette granulaire formé par les grains améliore le comportement du mastic : plus la température est élevée, plus l'effet est accentué (*Voir Figure 1.31*). Par contre, pour les faibles teneurs en fillers (inférieures à 30 %), le comportement du mastic bitumineux s'avère indépendant du type de filler et de l'origine du bitume.

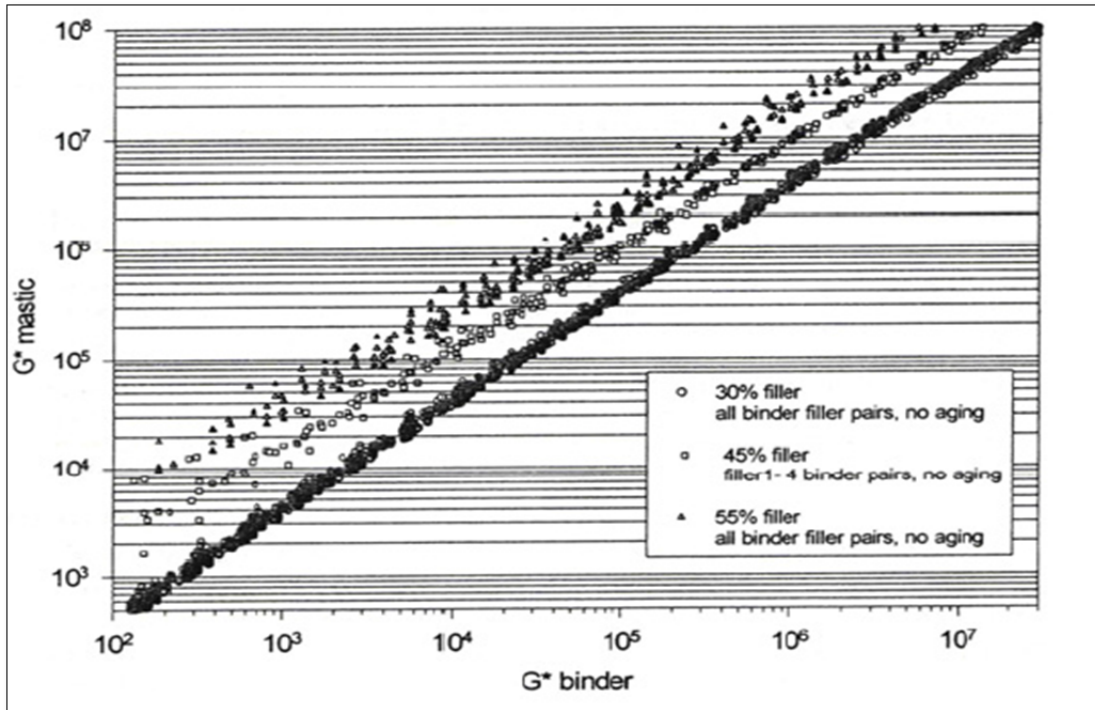


Figure 1.31 Rigidification du bitume par différentes concentrations de fines
Tirée de Soenen et Teugels (1999)

Durand et coll. (1997) ont aussi montré qu'une concentration en fines de moins de 30 % n'intervient pas de manière significative dans la rhéologie du mastic. Cependant, pour de plus fortes concentrations, les pores des particules absorbent une partie des huiles du bitume d'où la genèse d'un réseau rigide de : fines / résines / asphaltènes présentant une grande résistance à la déformation et à l'orniérage (*Voir* Figure 1.32).

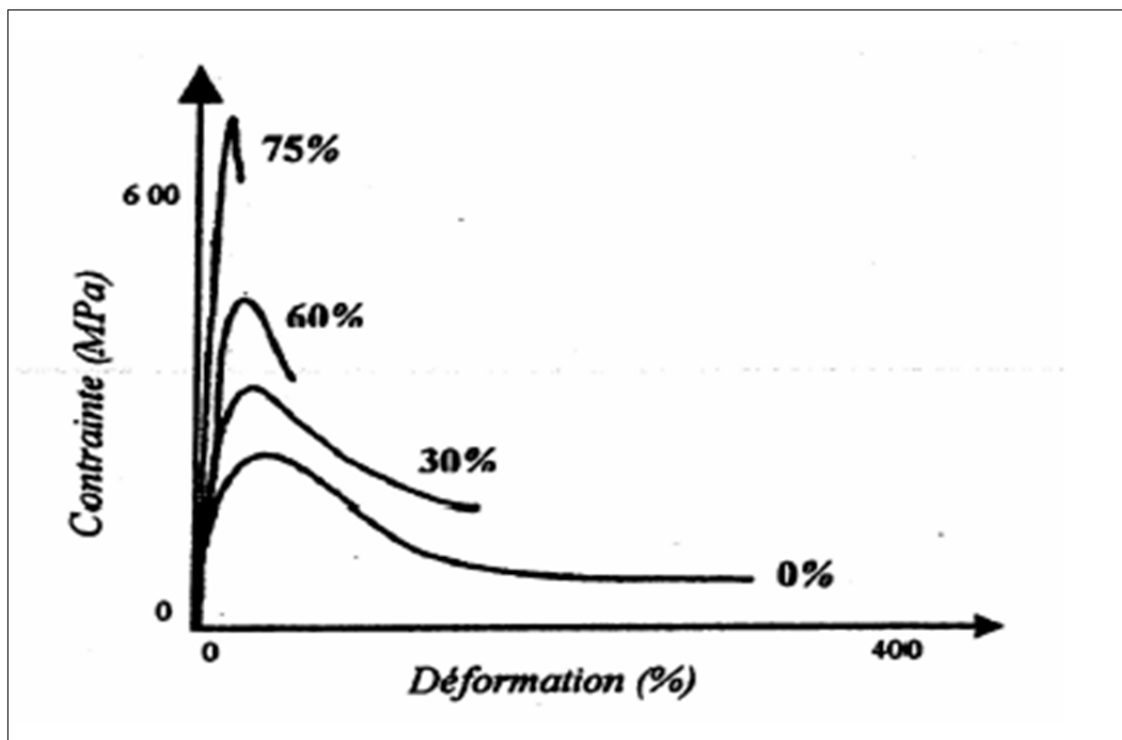


Figure 1.32 Contrainte de rupture (traction) en fonction de la fraction volumique et du niveau de déformation
Tirée de Durand et al (1997)

1.5.2.4 Mécanismes de renforcement du bitume par le filler

Les surfaces spécifiques élevées, les textures rugueuses et les taux d'absorption élevés du filler permettent d'augmenter la rigidité du mastic bitumineux (Olard, 2003). En effet, il existe (3) principaux types de renforcement des liants :

- le renforcement par remplissage d'un volume dû à la présence d'inclusions rigides dans une matrice moins rigide;
- le renforcement physico-chimique causé par les effets d'interface bitume/fillers (il inclut l'absorption et l'adsorption);
- le renforcement par interaction de particules dû au contact entre les particules : plus on augmente la teneur en fines, plus le renforcement par interaction est significatif.

Lesueur (2002) a mentionné qu'autour des particules, existe une couche d'asphaltènes adsorbée et ce, quel que soit le type du filler étudié. Pour la chaux ou les cendres volantes, la taille de leurs particules est faible, ce qui permet d'augmenter l'effet de la couche adsorbée et de créer une augmentation de volume effectif des charges non négligeables.

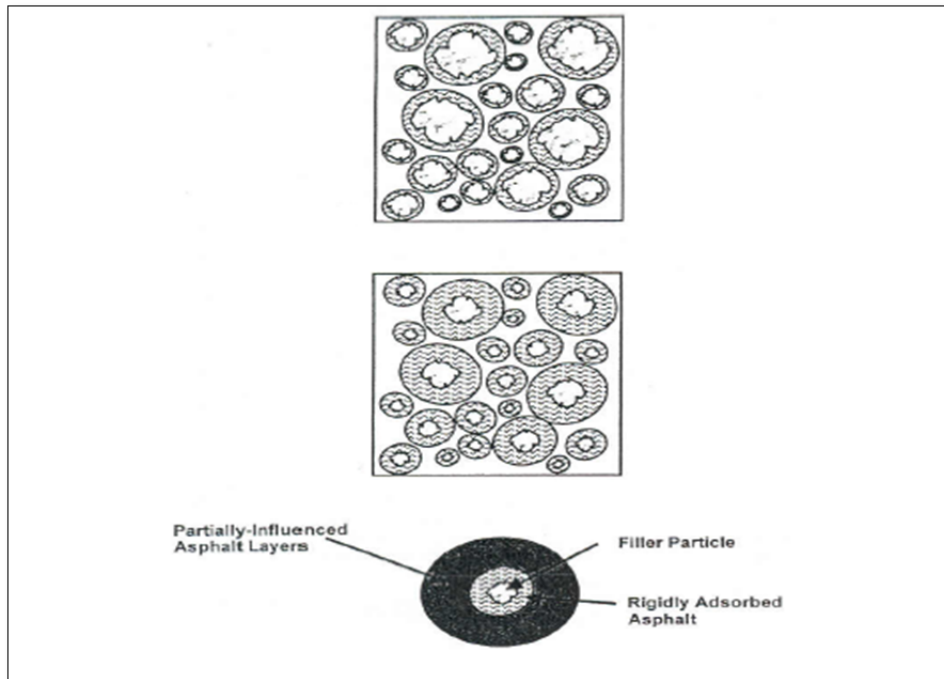


Figure 1.33 Couches de bitumes adsorbées
Tirée d'Olard (2003)

1.5.2.5 Influence des fillers de verre post-consommation sur les caractéristiques rhéologiques des mastics (résultats préliminaires)

Au cours des derniers mois, des essais au DSR et au Viscosimètre Brookfield ont été réalisés au LCMB par l'étudiant Guillaume Raquin afin d'étudier le comportement des mastics avec particules de verre incorporées. On rappelle que l'étude de rhéologie des mastics avec verre permet d'avoir une bonne idée sur les caractéristiques du verre post-consommation que le LCMB vise à intégrer aux enrobés bitumineux pour améliorer leur performance tout en permettant la récupération d'un matériau de qualité qui est actuellement disposé en grandes quantités dans les sites d'enfouissement québécois.

Les essais ont été réalisés sur des mastics constitués d'un bitume standard PG 58-28 en testant trois proportions volumiques de fillers (5, 10 et 15 %), puis sur des mastics à base de bitume PG 64-34 à 15 % de fillers. Cette étude vise à étudier l'influence des fillers de verre sur le comportement d'un mastic en comparant la rhéologie d'un mastic avec verre avec celle d'un mastic avec calcaire (conventionnel). Dans une seconde perspective, l'influence de la nature du liant sur le comportement d'un mastic a été étudiée en comparant le comportement de deux mastics constitués d'un bitume pur PG 58-28 et d'un bitume modifié PG 64-34 contenant des polymères. Le Tableau 1.5 donne les caractéristiques des fillers de verre A utilisés.

Tableau 1.5 Caractéristiques des fillers de verre A

Classe granulaire		0-315 μ m (verre A)
Nature minéralogique		Silice
Densité brute (dgb)		2,532
Absorption en eau (%)		0,07
Granulométrie	Tamis (mm)	% passants
	2,5	100
	1,25	100
	0,63	100
	0,315	100
	0,16	92
	0,08	65,8

À la lumière des résultats obtenus à partir du DSR et du viscosimètre Brookfield, on affirme que :

- plus on augmente la proportion en filler, plus la rigidité du mastic augmente;
- les mastics avec verre semblent plus performants que les mastics avec calcaire à la proportion en filler de 15%;

- la température extrême optimale d'utilisation du mastic avec verre à 15 % atteint 65,1 °C, contre 63,4 °C pour les mastics avec calcaire. Ce qui permet de conclure que le mastic à 15 % de fillers de verre offre un meilleur comportement à l'orniérage comparé au mastic avec calcaire à la même proportion en filler;
- les mastics avec verre sont plus visqueux que les mastics avec calcaire, mais restent plus performants pour être mis en place lors de la construction de la chaussée;
- une affinité plus grande du filler calcaire avec le bitume modifié que le filler avec verre.

CHAPITRE 2

PRÉSENTATION DE L'ESSAI DE CISAILLEMENT ANNULAIRE

Ce présent chapitre est consacré à la description du déroulement de l'essai réalisé et du dispositif expérimental utilisé durant ce projet : le Rhéomètre à Cisaillement Annulaire de grandes dimensions (RCA). Ce type de rhéomètre, développé au laboratoire de l'Ecole Nationale des Travaux Publics de l'État (ENTPE, France) a été introduit au LCMB lors de ce projet.

Le Rhéomètre à Cisaillement Annulaire ou également nommé «Annular Shear Rheometer» (ASR) est un nouvel outil d'investigation permettant d'étudier la rhéologie des bitumes et/ou des mastics bitumineux dans le domaine viscoélastique linéaire. Il consiste à appliquer des sollicitations cycliques sur des éprouvettes de bitume ou de mastic de forme annulaire.

Comparé aux autres rhéomètres, le RCA présente plusieurs avantages. En effet, il permet de solliciter en cisaillement des éprouvettes de taille importante relativement à celles utilisées lors des essais classiques de rhéologie sur bitume. De plus, l'épaisseur de l'éprouvette annulaire est très petite par rapport à son diamètre, ce qui permet d'appliquer un champ de contraintes et de déformations quasi-identique en chaque point de l'échantillon testé. L'essai de cisaillement annulaire peut être donc considéré comme un essai quasi-homogène, ce qui donne accès à la loi de comportement sans recours à des hypothèses supplémentaires. Cet essai peut également couvrir une large gamme de températures et de fréquences avec un même échantillon.

Enfin, le principe de fonctionnement ainsi que l'instrumentation de cet essai sont illustrés dans ce qui suit. La préparation de l'éprouvette et le montage des échantillons, les modes de pilotage de l'essai, l'acquisition et le traitement des données sont détaillés aux sections suivantes.

2.1 Principe de fonctionnement

L'essai de cisaillement annulaire permet de solliciter, grâce à une presse hydraulique MTS (*Mechanical Testing and Simulation*), un cylindre creux de bitume ou de mastic à différents couples température-fréquence. Dans le domaine viscoélastique linéaire (domaine des petites déformations), on caractérise le comportement des matériaux en déterminant le module complexe de cisaillement (G^*). Ce dernier peut être calculé à partir de la distorsion (mesurée à l'aide des extensomètres) et la contrainte de cisaillement (mesurée à l'aide des capteurs de force).

L'éprouvette testée via le rhéomètre à cisaillement annulaire a une hauteur de 40 mm, une épaisseur de 5 mm et un diamètre intérieur de 95 mm. Le moule où on coule l'échantillon est constitué de deux cylindres coaxiaux en duralumin (alliage à base d'aluminium) : un cylindre interne et un cylindre externe. Le cylindre externe est fixé sur un support en aluminium (embase) relié au capteur de force. Le cylindre interne est fixé au piston de la presse MTS via un axe d'acier qui transmet les efforts (*Voir* Figure 2.2). Le matériau est sollicité en cisaillement en imposant un déplacement axial sinusoïdal du cylindre interne par rapport au cylindre externe.

Enfin, les essais peuvent être effectués à différentes températures et fréquences et réalisés au sein d'une enceinte thermique régulée.

La Figure 2.1 montre une vue d'ensemble du RCA.

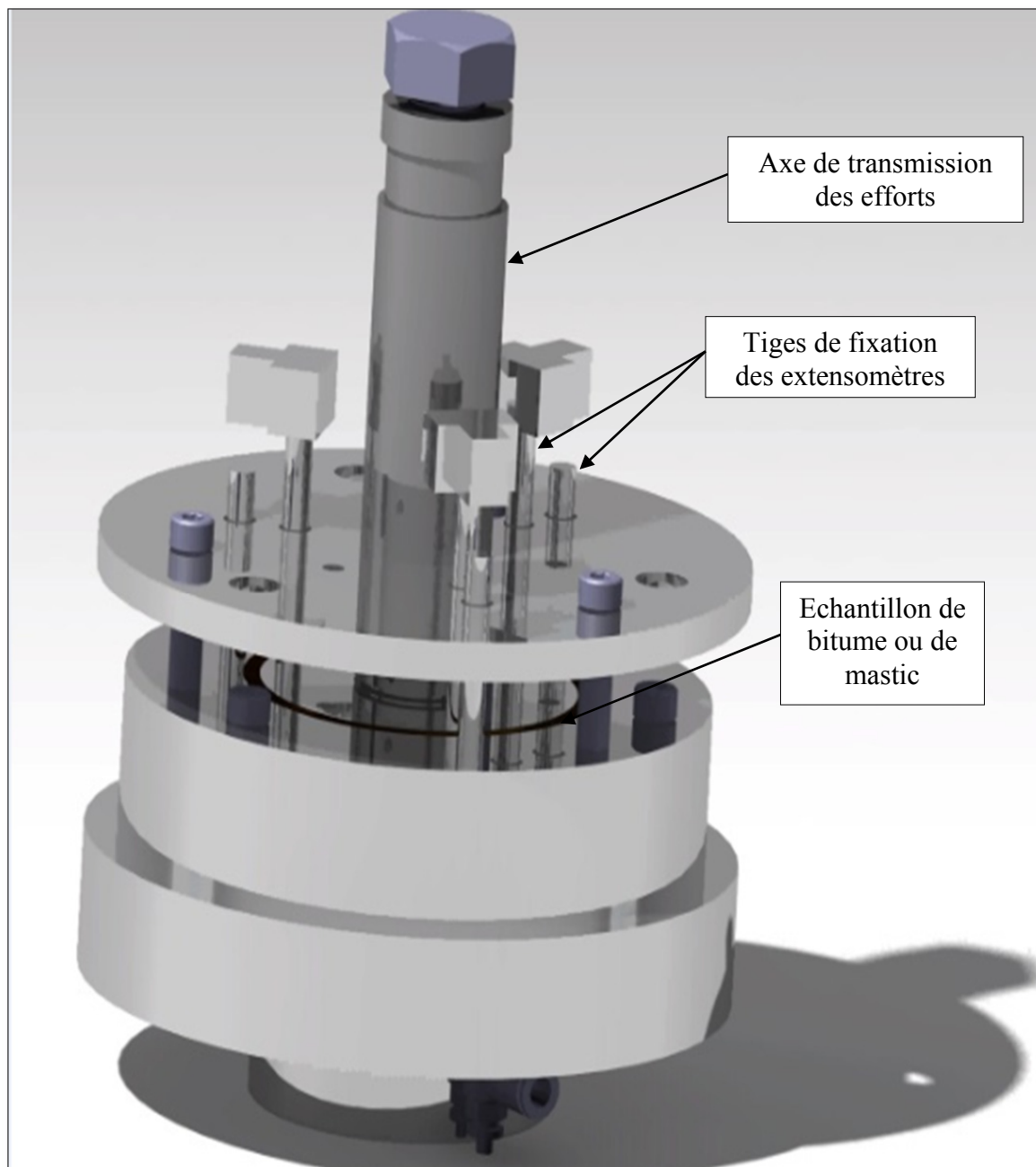


Figure 2.1 Rhéomètre à cisaillement annulaire (Réalisé par Catia V5)

L'instrumentation est détaillée au paragraphe 2.2.

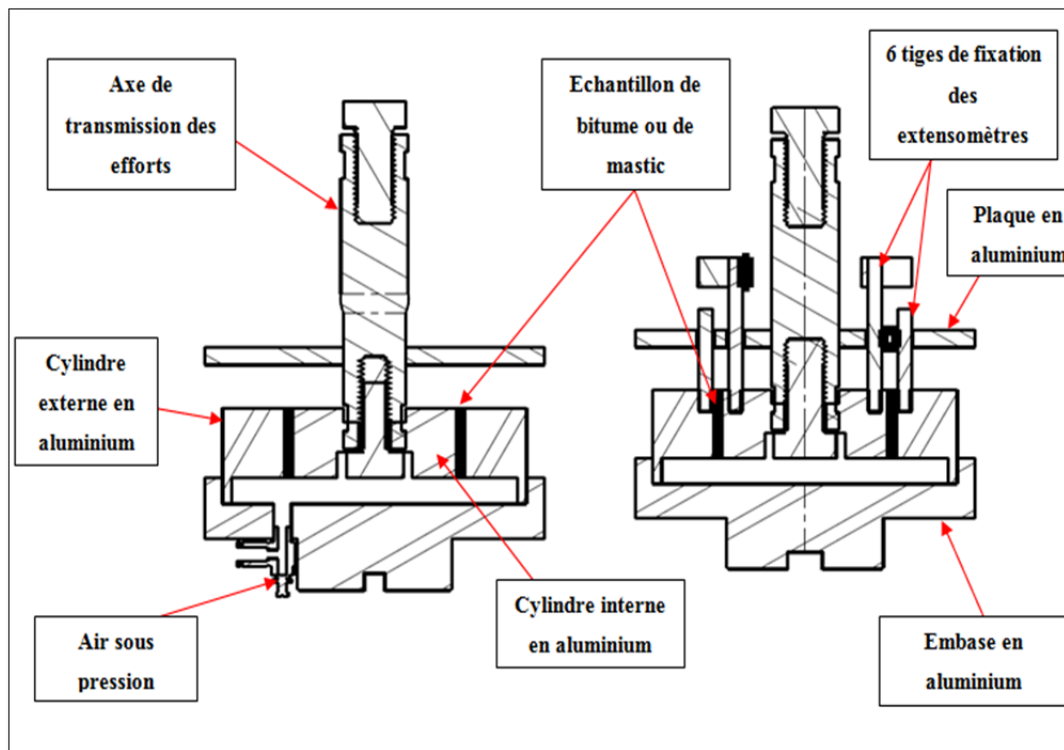


Figure 2.2 Éléments constituant le rhéomètre à cisaillement annulaire
Coupes réalisées par Catia V5

La plaque de stabilisation en aluminium peut être située en position basse pour assurer un lien mécanique entre le cylindre extérieur et le cylindre intérieur de sorte que l'échantillon de bitume ou de mastic n'est pas sollicité (*Voir Figure 2.3a*). Par contre, en cours d'essai, elle sera soulevée par des cales en aluminium afin de permettre les sollicitations en cisaillement entre le cylindre intérieur et extérieur (*Voir Figure 2.3b*).

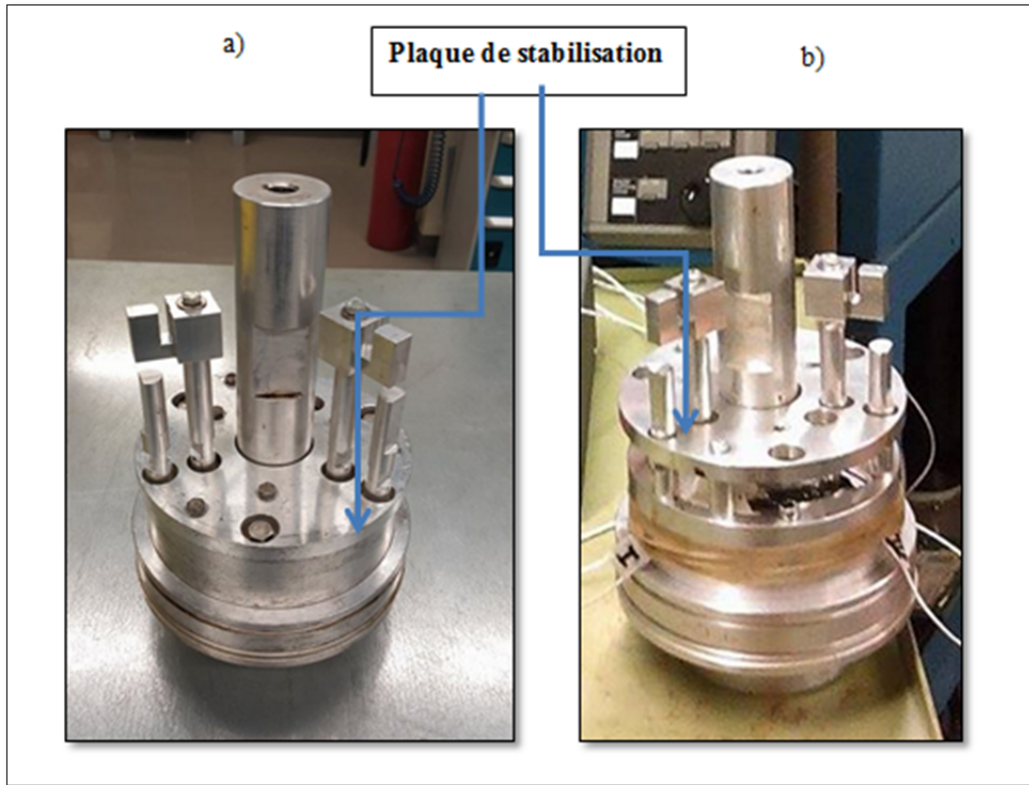


Figure 2.3 a) Cellule de cisaillement annulaire avec plaque de stabilisation soulevée b) Cellule de cisaillement annulaire avec plaque de stabilisation en position basse

La Figure 2.4 illustre une couronne de matériaux sollicitée en cisaillement annulaire, les tenseurs de contraintes $\underline{\underline{\sigma}}$ et des déformations $\underline{\underline{\epsilon}}$ dus aux déplacements axiaux du cylindre interne par rapport au cylindre externe s'écrivent en coordonnées polaires $(\vec{e}_r, \vec{e}_\theta, \vec{e}_z)$ comme suit :

$$\underline{\underline{\sigma}} = \begin{pmatrix} \sigma_{rr} & \sigma_{r\theta} & \sigma_{rz} \\ \sigma_{r\theta} & \sigma_{\theta\theta} & \sigma_{\theta z} \\ \sigma_{rz} & \sigma_{\theta z} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_{rr} & 0 & \tau \\ 0 & \sigma_{\theta\theta} & 0 \\ \tau & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

Avec τ : contrainte de cisaillement en (Pa).

$$\underline{\underline{\varepsilon}} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{rr} & \varepsilon_{r\theta} & \varepsilon_{rz} \\ \varepsilon_{r\theta} & \varepsilon_{\theta\theta} & \varepsilon_{\theta z} \\ \varepsilon_{rz} & \varepsilon_{\theta z} & \varepsilon_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \varepsilon_{rz} \\ 0 & 0 & 0 \\ \varepsilon_{rz} & 0 & \varepsilon_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \gamma/2 \\ 0 & 0 & 0 \\ \gamma/2 & 0 & \varepsilon_{zz} \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

Avec γ : distorsion en (rad).

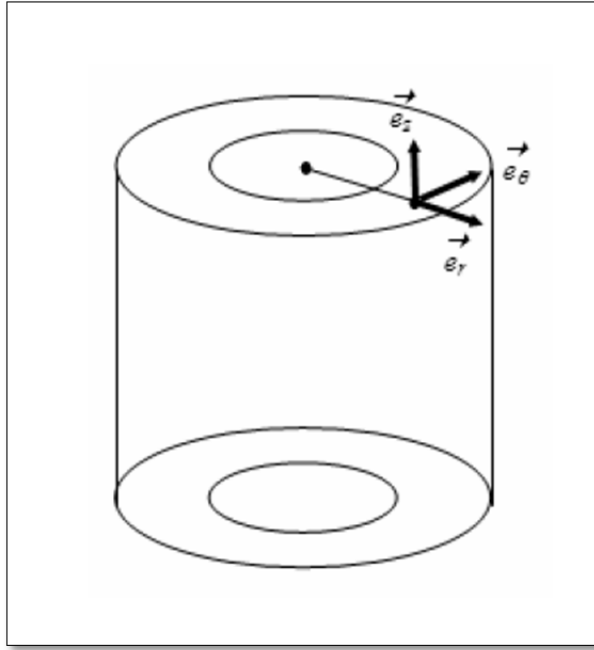


Figure 2.4 Représentation d'un cylindre creux en coordonnées polaires

Dans le domaine VEL, la loi de comportement d'un matériau isotrope soumis à des sollicitations en cisaillement permet de relier la distorsion γ (ou ε dans le cas d'une déformation en compression/traction) et la contrainte de cisaillement τ (ou σ dans le cas d'une déformation en compression/traction) par la relation suivante :

$$\tau = G \gamma \quad (2.3)$$

Avec :

- τ : contrainte de cisaillement (ou cission),
- γ : distorsion (ou angle de déformation relative),

- G : module de cisaillement (ou module de Coulomb).

La contrainte de cisaillement τ est une contrainte appliquée de manière parallèle ou tangentielle à une face d'un matériau (*Voir* Figure 2.5). C'est le rapport d'une force à une surface exprimée en Pa ou pour les grandes valeurs en MPa. Elle est calculée grâce au signal enregistré par le capteur de force utilisé durant l'essai. Elle est définie par la relation suivante :

$$\tau = \frac{F}{A} = \frac{F}{\pi \phi_{moy} L} \quad (2.4)$$

Avec :

- F : force mesurée par le capteur (N);
- A : aire de la section sur laquelle la Force F est appliquée (mm^2);
- ϕ_{moy} : diamètre moyen de l'éprouvette de bitume ou de mastic (soit 100 mm);
- L : hauteur de l'éprouvette annulaire (soit 40 mm).

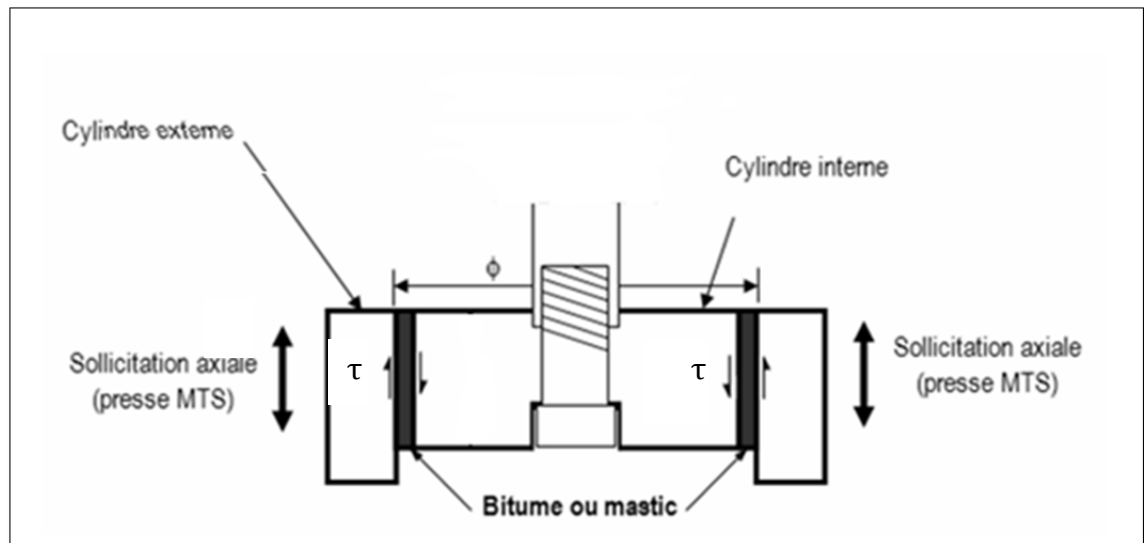


Figure 2.5 Éprouvette sollicitée en cisaillement
Tirée de Van Rompu et Di Benedetto (2006)

En absence de sollicitations, la section diamétrale de l'éprouvette est rectangulaire de hauteur L et de largeur e (épaisseur de l'anneau) (*Voir* Figure 2.6).

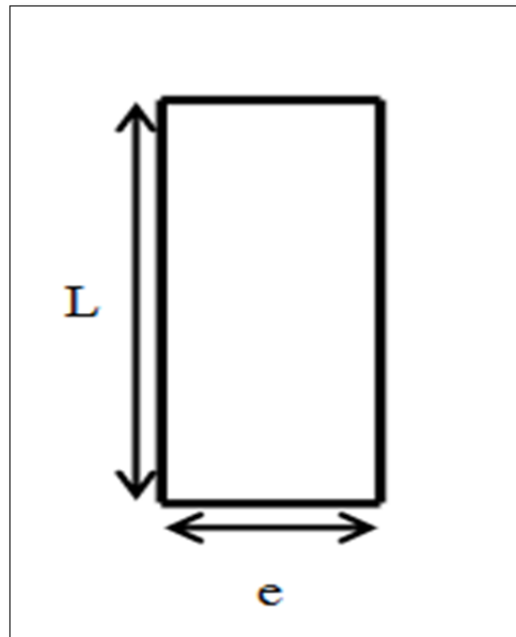


Figure 2.6 Section diamétrale d'une éprouvette non sollicitée

Lorsque l'éprouvette de bitume ou de mastic est soumise à des sollicitations, le déplacement relatif (ΔI) entre le cylindre interne et externe fait apparaître une variation angulaire entre les directions radiales et axiales nommée distorsion (γ) (*Voir* Figure 2.7). En tenant compte de l'hypothèse d'homogénéité de l'essai de cisaillement annulaire, la distorsion γ est la même en chaque point de l'éprouvette.

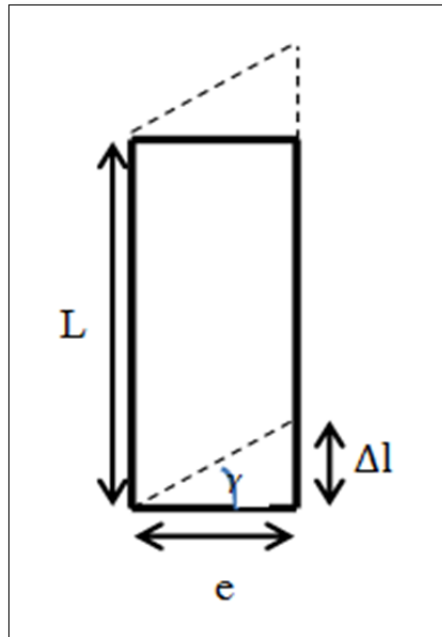


Figure 2.7 Section diamétrale d'une éprouvette sollicitée

Soit :

$$\tan \gamma = \frac{\Delta l}{e} \quad (2.5)$$

γ étant petit (essai réalisé dans le domaine des petites déformations).

Donc,

$$\gamma = \tan \gamma = \frac{\Delta l}{e} \quad (2.6)$$

La distorsion est calculée à partir de la moyenne des trois déformations (ϵ_{ext}) mesurées à l'aide des extensomètres placés à 120° autour de l'éprouvette et fixés via des tiges en aluminium solidarissant le cylindre interne et externe (*Voir* Figure 2.8).

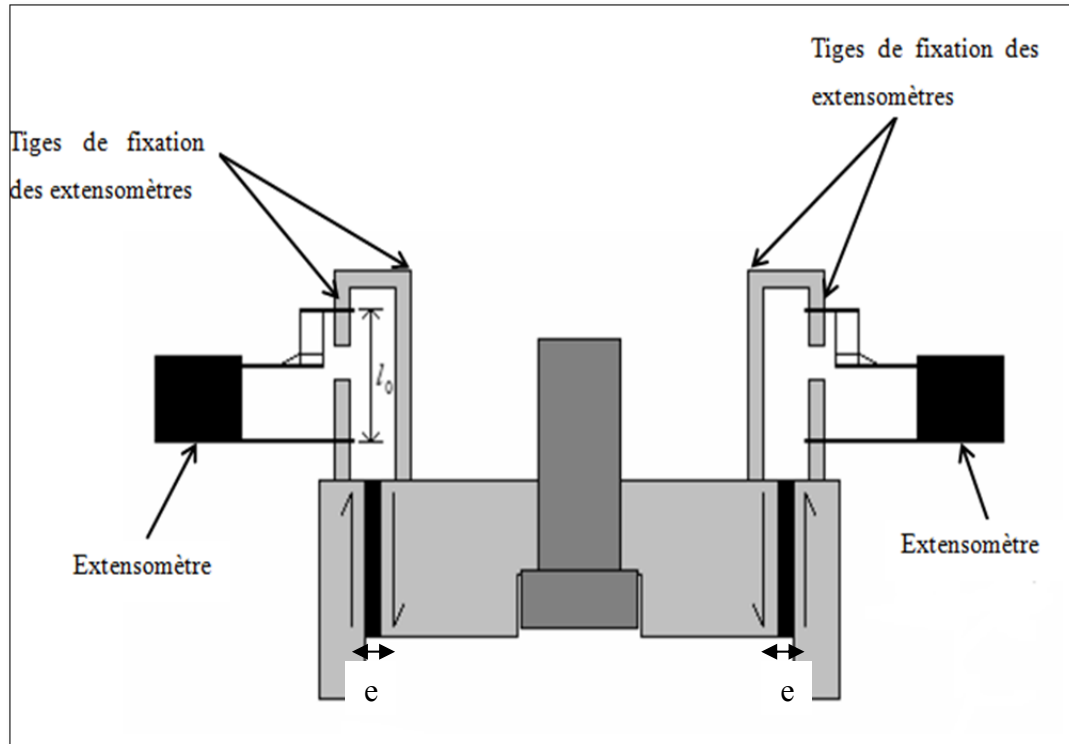


Figure 2.8 Coupe du montage
Tirée de Van Rompu et Di Benedetto (2006)

Soit :

$$\gamma = \frac{\Delta l}{e} = \frac{\varepsilon_{ext} \cdot l_0}{e} \quad (2.7)$$

Avec :

- Δl : déplacement relatif entre le cylindre interne et externe;
- e : épaisseur de l'éprouvette annulaire;
- ε_{ext} : moyenne des déformations mesurées par les 3 extensomètres;
- l_0 : longueur initiale des extensomètres ($l_0 = 50 \text{ mm}$).

Puisque les matériaux testés sont soumis à des sollicitations axiales sinusoïdales de pulsation (ω), une écriture complexe dans l'espace fréquentiel est obligatoire et l'équation (2.1) de la loi de comportement des matériaux devient :

$$\tau^* = G^* \gamma^* \quad (2.8)$$

Avec
$$\tau^* = \tau_A e^{i\omega t} \text{ et } \gamma^* = \gamma_A e^{i(\omega t - \varphi)} \quad (2.9)$$

D'où
$$G^* = \frac{\tau_A e^{i\omega t}}{\gamma_A e^{i(\omega t - \varphi)}} = \frac{\tau_A}{\gamma_A} e^{i\varphi} \quad (2.10)$$

La norme du module complexe de cisaillement ($|G^*|$) (également appelée module dynamique en Amérique du nord) est définie comme le rapport des amplitudes de contraintes (τ_A) et de distorsion (γ_A).

Soit :
$$|G^*| = \frac{\tau_A}{\gamma_A} \quad (2.11)$$

L'argument de G^* est l'angle de phase (ou angle de perte) qui est lié au décalage temporel entre la contrainte et la distorsion par la relation suivante (*Voir* Figure 2.9) :

$$\varphi = \arg(G^*) = \omega \Delta t \quad (2.12)$$

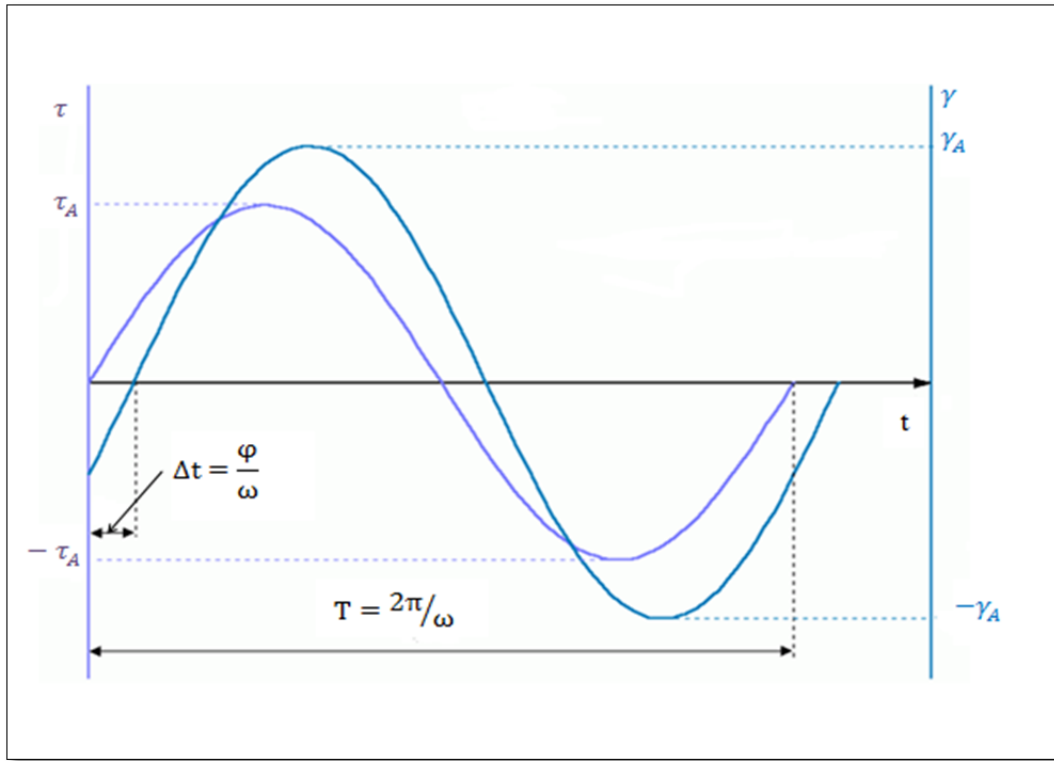


Figure 2.9 Angle de déphasage entre une courbe de contrainte de cisaillement et une courbe de distorsion

À mentionner que $T = \frac{2\pi}{\omega}$ est la période.

$|G^*|$ et φ caractérisent le comportement thermomécanique des matériaux bitumineux dans le domaine viscoélastique linéaire. Ils dépendent uniquement de la température et la fréquence auxquelles les essais sont réalisés. On rappelle que le RCA consiste à réaliser des essais de module complexe de cisaillement dans une large gamme de températures et de fréquences de -15 à +45 °C et de 0,03 à 10 Hz.

2.2 Appareils et instruments de mesures

2.2.1 Presse MTS 810

La presse MTS est une machine installée au LCMB du département Génie de la construction de l'ÉTS (*Voir* Figure 2.10). Sa principale activité est la détermination des paramètres rhéologiques afin de caractériser le comportement thermomécanique des matériaux bitumineux. Elle permet de mener également des essais :

- de fatigue en compression et/ou traction,
- de cisaillement,
- de fluage,
- de perméabilité sous contraintes,
- d'orniérage.

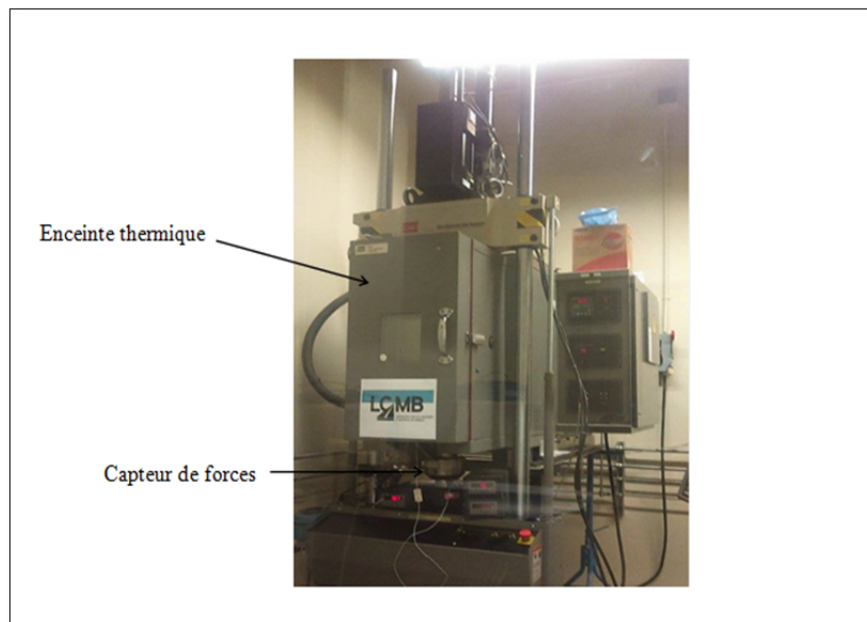


Figure 2.10 Presse MTS810 (LCMB)

La presse MTS est constituée :

- d'une presse hydraulique,
- d'injecteurs électromécaniques de fluides sous pression,
- d'une cellule de confinement,
- d'une chambre thermique régulée (enceinte),
- d'une cellule de charge permettant de mesurer les efforts transmis via un axe en acier (aussi appelée capteur de forces),
- d'un système de pilotage et de mesures informatisé.

La presse MTS est commandée par le logiciel «Teststar II» installé à l'ordinateur relié à celle-ci. Cette dernière pouvant appliquer des efforts selon l'axe principal allant jusqu'à 100 kN, mais calibrée de 0 à 25 kN.

Elle consiste à tester des échantillons à des forces comparables à celles que subit une chaussée soumise à des millions de passages de camions roulant à 100 km/h (Perraton, 2009).

2.2.2 Enceinte thermique

L'éprouvette de bitume ou de mastic est placée au sein d'une enceinte thermique afin d'effectuer des essais de modules complexes. L'enceinte est capable de réguler automatiquement la température sur une plage de -70 °F à 200 °F (-56.67 °C à 93.33 °C) grâce au programme «Labview». La température dans l'enceinte est contrôlée et enregistrée à l'aide d'une sonde reliée à l'ordinateur (*Voir Figure 2.10*).

2.2.3 Capteurs de déplacement (extensomètres)

Au cours des essais, les déplacements (Δl) imposés entre le cylindre intérieur et extérieur sont mesurés au moyen de 3 extensomètres fixés de façon régulière autour de l'éprouvette (espacés de 120°). Les deux branches de chaque extensomètre sont attachées via un ressort

aux tiges de fixation en aluminium permettant d'unir le cylindre interne et externe (Voir Figure 2.11).

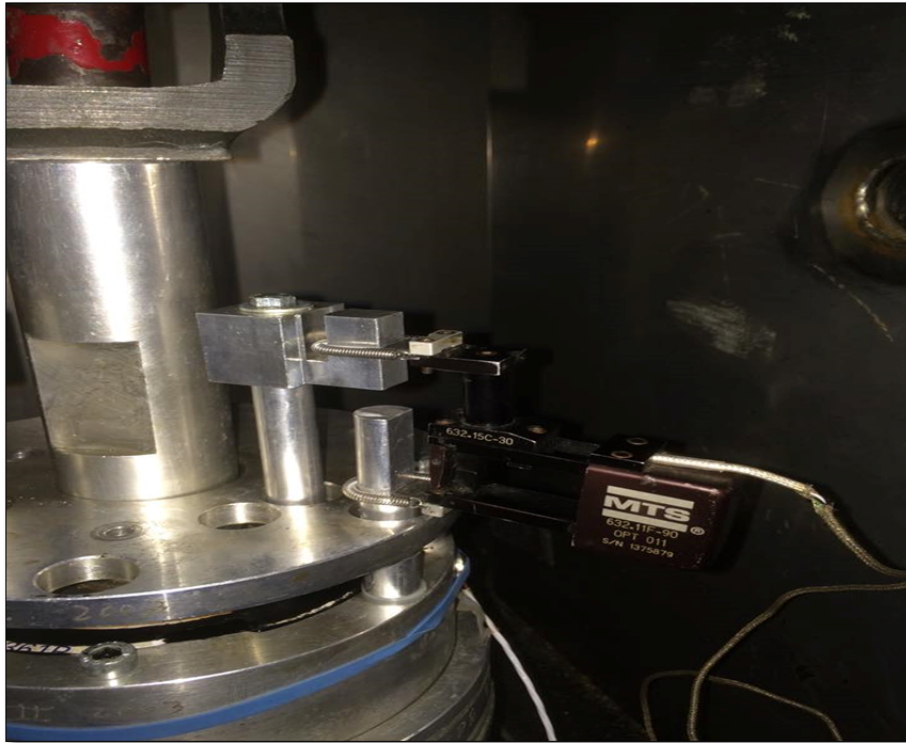


Figure 2.11 Extensomètre et tiges de fixation en aluminium (LCMB)

En faisant la moyenne des trois déplacements mesurés par les trois extensomètres, on connaît la valeur du déplacement moyen entre le cylindre interne et externe. Ceci permet d'avoir la déformation moyenne des extensomètres conformément à l'équation suivante :

$$\varepsilon_{ext} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2.13)$$

où ε_{ext} , Δl et l_0 sont définis précédemment.

Ces extensomètres possèdent les caractéristiques suivantes :

- une longueur initiale entre les tiges $l_0 = 50 \text{ mm}$,
- une précision de mesure de déformation de quelques microns ($\pm 0,5 \text{ }\mu\text{m}$),
- une gamme de mesures de $-2000 \text{ }\mu\text{m}$ à $+2000 \text{ }\mu\text{m}$.

2.2.4 Capteurs de force (cellules de charge)

Une des particularités du RCA est d'être capable de mesurer des paramètres rhéologiques de bitume ou de mastic bitumineux sur une large gamme de températures avec un même et seul échantillon. Le RCA est couplé avec deux capteurs de force (ou cellules de charge) dont l'utilisation dépend de la température d'essai et donc, de l'état de l'échantillon. Il est important de mentionner que les deux capteurs ne sont pas utilisés conjointement et c'est grâce à un axe en acier que les efforts sont transmis de l'échantillon à la cellule de charge.

Aux basses températures ($\leq -5^\circ\text{C}$), quand les matériaux à tester sont rigides, on utilise un capteur qui peut mesurer des efforts allant jusqu'à 100 kN , sa précision est de ($\pm 10 \text{ N}$). Cependant, pour des températures relativement élevées ($> -5^\circ\text{C}$), les matériaux sont moins rigides et, par conséquent, le capteur de capacité 100 kN devient incapable d'enregistrer des signaux de qualité. Il convient alors d'utiliser une autre cellule de charge plus précise de calibre plus faible (5 kN) et de précision ($\pm 1 \text{ N}$) qu'on limite entre -4000 N et $+4000 \text{ N}$ pour éviter de la briser.

Enfin, il est possible d'effectuer des essais de module complexe de cisaillement à différentes températures tout en gardant le même échantillon, chose qui est quasiment impossible avec les rhéomètres classiques. À noter que la température de changement de cellule de charge dépend du type de matériau testé. La Figure 2.12 illustre le capteur de capacité 100 kN utilisé lors des essais.



Figure 2.12 Capteur de force (LCMB)

2.2.5 Capteurs de température

La température est l'un des principaux paramètres qui influencent le comportement d'un bitume ou d'un mastic bitumineux. Dans le cadre de cette étude, il est important de contrôler la température de l'échantillon testé ainsi que son évolution dans le temps. Pour ce faire, trois capteurs de température de type PT100 disposés régulièrement autour de l'éprouvette, vis-à-vis chacun des extensomètres, sont reliés à l'ordinateur afin d'enregistrer la température de l'échantillon à chaque pas de temps défini à l'avance. Pour analyser les résultats, on utilise la moyenne des trois températures enregistrées (*Voir* Figure 2.13).

Il faut également contrôler la température de l'enceinte thermique tout au long des essais. En effet, un thermocouple de précision ($\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$) est utilisé afin de vérifier qu'aucun changement imprévisible de température ne s'est produit.



Figure 2.13 Capteurs de température PT100 (LCMB)

2.2.6 Système d'acquisition et pilotage

Le pilotage est mené par le logiciel «Teststar II» installé à l'ordinateur branché avec la presse MTS. Il sert à commander les mouvements de la presse en lui envoyant différents types de signaux (carrés, triangles, sinusoïde...) en précisant la fréquence, le nombre de cycles de sollicitation, l'amplitude du signal (déplacement imposé), les températures d'essai.

L'acquisition est effectuée par le même logiciel qui enregistre plusieurs mesures sous forme numérique qu'on appelle généralement «résultats brutes».

2.3 Préparation et montage des échantillons

2.3.1 Préparation de l'éprouvette

Une procédure expérimentale détaillée concernant la préparation des échantillons à tester est présentée à l'ANNEXE I.

2.3.2 Montage des échantillons

Avant de mettre en place la cellule du RCA avec l'échantillon à tester, la presse MTS est démontée afin de mettre en place la cellule de charge qui convient aux températures d'essai. On rappelle que dans ce projet, la cellule de charge de capacité 5 kN est requise pour des températures strictement supérieures à -5 °C (5, 15, 25, 35 et 45 °C) tandis que la cellule de charge de calibre 100 kN est destinée aux températures inférieures à -5 °C (-5, -15 et -25 °C).

Après la préparation de l'éprouvette à cisaillement annulaire (*Voir* ANNEXE I), on procède à l'installation des trois extensomètres. Ils sont attachés aux tiges de fixation par l'intermédiaire de ressorts métalliques (*Voir* Figure 2.11). Après la mise en place des capteurs de déformations, on fixe l'ensemble sur l'embase de la presse à l'intérieur de l'enceinte thermique. Ensuite, on procède au boulonnage de l'axe de transmission des efforts de la cellule de cisaillement annulaire au piston de la presse. À ce moment l'éprouvette est attachée à la presse et au capteur de forces sans toutefois que l'échantillon à tester ne soit sollicité. En effet, une plaque de stabilisation relie mécaniquement en permanence les cylindres extérieur et intérieur tout au long du montage (*Voir* Figure 2.3). Pour que l'échantillon à tester soit sollicité sous l'action du piston, il faut impérativement enlever la plaque de stabilisation, laquelle est maintenue suspendue à l'aide de cales cylindriques creuses (3) au-dessus de la cellule après avoir été désolidarisée. Avant de suspendre la plaque solidarifiant le cylindre intérieur et le cylindre extérieur, on pilote le vérin en mode de force en donnant une consigne de force zéro (± 10 N) pour éviter de solliciter précocement le matériau. On met en place les trois capteurs de températures disposés de manière régulière

autour de l'éprouvette. Après avoir désolidarisé la plaque de stabilisation de la cellule de cisaillement, le matériau est donc sous sollicitations. On peut à ce moment-là retirer les goupilles de blocage des extensomètres, un zéro des signaux de déformation est effectué sur le logiciel qui commande la presse hydraulique avant de lancer l'essai. À titre de rappel, il est extrêmement important d'imposer une limite d'utilisation des extensomètres afin d'éviter de les briser. Si une limite est atteinte par l'un des capteurs, le logiciel commande un arrêt immédiat de la presse et passe en mode de déplacement avec une consigne de déplacement nulle. Lorsque l'ensemble des étapes énoncées précédemment a été réalisé, le pilotage du vérin est activé en mode de contrôle de déformation avec un pilotage en mode de déformation moyenne. À noter que l'essai ne peut se réaliser qu'après stabilisation de la température au sein de la chambre thermique. Des détails concernant cette étape sont donnés au paragraphe 2.3.3.

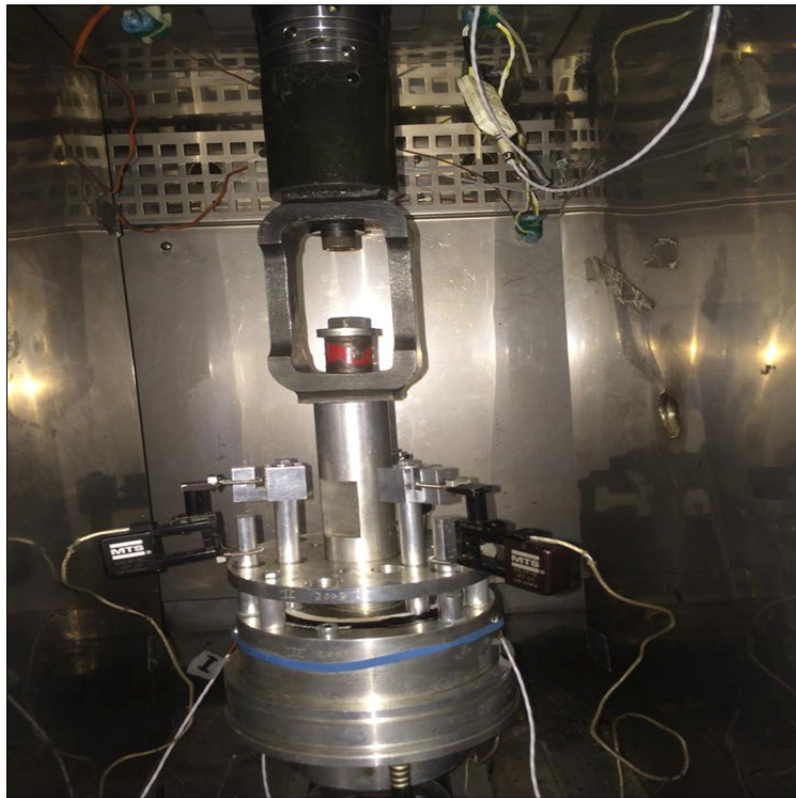


Figure 2.14 RCA monté sur une presse hydraulique (LCMB)

2.3.3 Mise en température du RCA

Les matériaux bitumineux sont susceptibles à la température. Ce qui amène à contrôler cette dernière lors des essais grâce à une enceinte thermique. Le pilotage de l'enceinte thermique est assuré par le logiciel «Teststar II» via le programme «Watlow». On tient à rappeler que la température de la chambre thermique est mesurée par un thermocouple tandis que la température de l'éprouvette est mesurée par trois capteurs de type PT100 placés autour du RCA.

L'essai ne peut être effectué qu'après homogénéisation de la température de l'échantillon et celle de l'enceinte thermique. On note que la stabilité n'est atteinte qu'après environ 2h30. Il est essentiel d'attendre au moins 2h30 entre la fin du montage et le déclenchement de l'essai si on souhaite faire un saut de 10 °C. À noter que cette valeur est surestimée pour qu'on puisse être sûr de la stabilisation de température au sein du corps d'épreuve.

Enfin, l'essai de cisaillement annulaire est réalisé sur une large plage de températures (-25, -15, -5, +5, +15, +25, +45, +55 °C), ce dernier peut donc durer pendant quelques jours (5 jours environ) compte tenu du changement de la cellule de charge (1 à 2 heures).

2.3.4 Système de mise en pression

Pour des températures élevées (supérieures à 25 °C), le matériau testé flue sous l'effet de la gravité (poids propre) (*Voir Figure 2.15*).

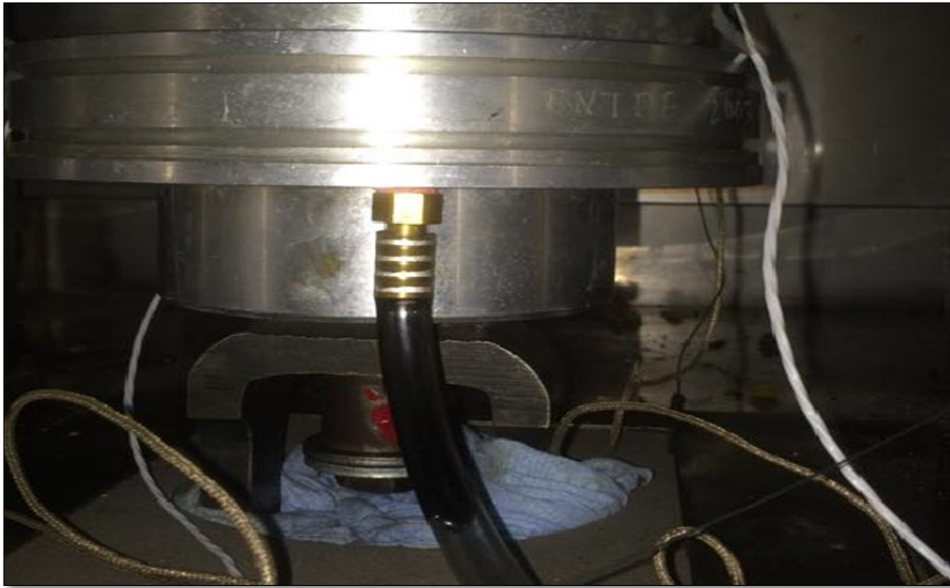


Figure 2.15 Fluage du liant dans le tuyau contenant l'air sous pression à 35 °C (LCMB)

Pour surmonter ce problème, un dispositif de mise en pression a été installé près de la presse MTS. En effet, on applique sous l'échantillon, à travers l'embase du RCA, une pression d'air assez faible de l'ordre de 2 «inches of water» (5 mbar). La pression d'air est arrivée à un régulateur qui permet de la réduire et la maintenir constante. Un tuyau résistant à 60 °C relié au régulateur de pression est connecté à l'embase de la cellule de cisaillement annulaire pour empêcher le liant de couler. On veille à ce que les pressions ne soient pas trop élevées pour éviter le débordement du matériau de la surface supérieure de l'éprouvette. La pression est mesurée à l'aide du régulateur de pression (*Voir* Figure 2.16). Il est important de souligner que le dispositif de mise en pression doit être déconnecter durant les sollicitations car il peut engendrer des forces parasites qui perturbent l'essai.

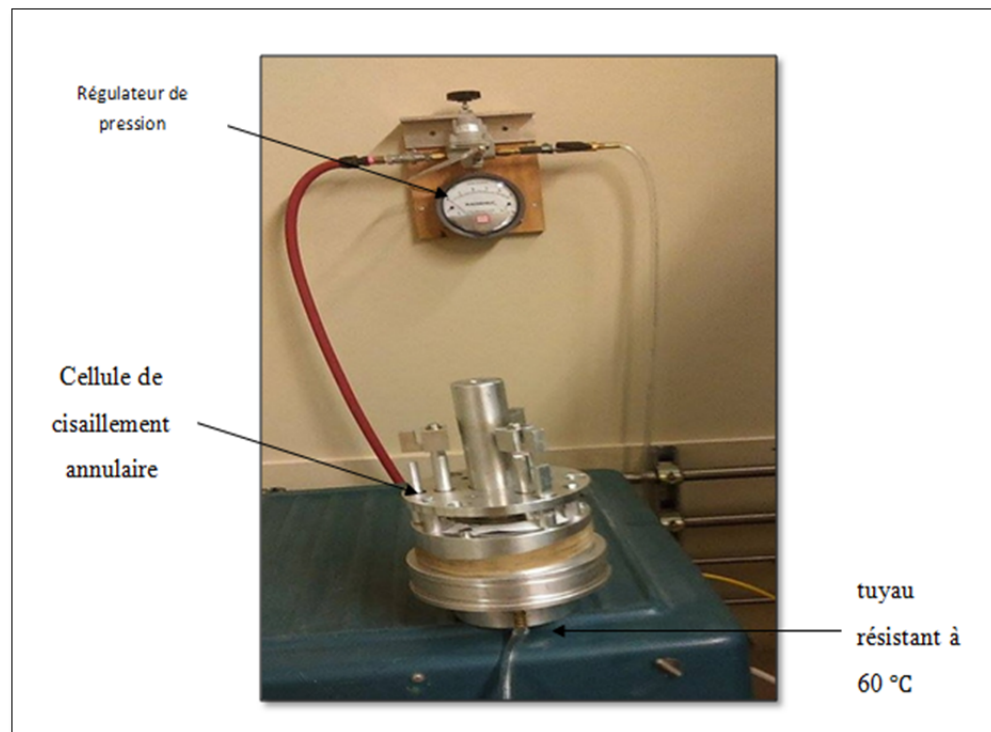


Figure 2.16 Dispositif de mise en pression (LCMB)

On peut également placer un disque fin en papier ciré (papier de revue peut être utilisé) sur la face inférieure de l'éprouvette annulaire de bitume ou de mastic juste après l'étape de coulage (*Voir* Figure 2.17). Ce disque empêchera le liant de fluer sous l'effet de la gravité. Il ne doit pas être épais pour ne pas engendrer des forces parasites qui perturbent l'essai.

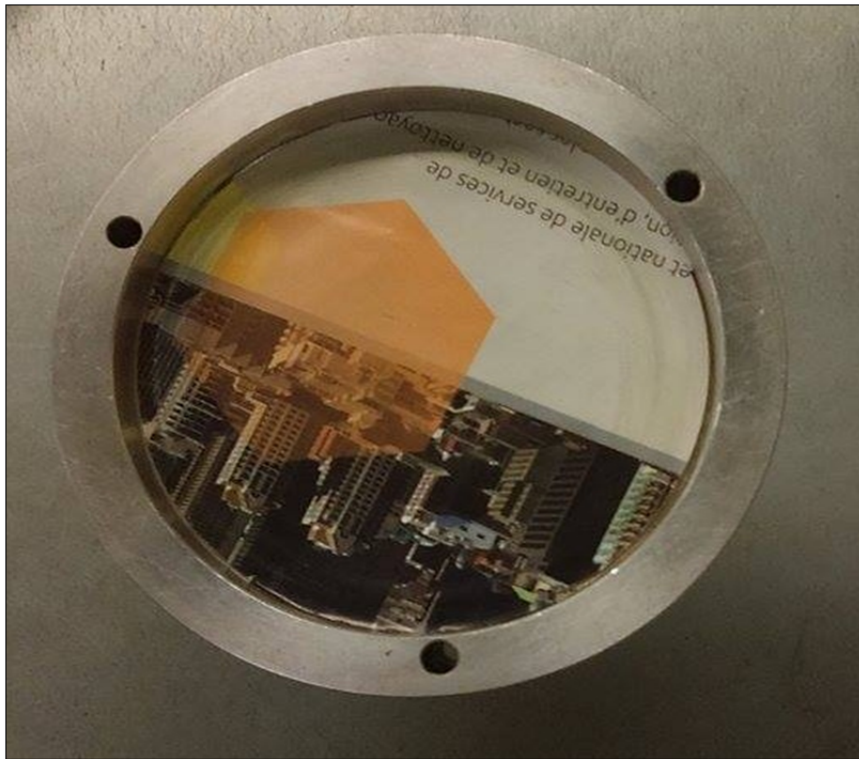


Figure 2.17 Papier ciré placé à la base du RCA pour empêcher le fluage du liant et permettre une distribution homogène de la pression d'air appliquée (LCMB)

2.4 Pilotage, acquisition et traitement des données

2.4.1 Pilotage

La presse hydraulique MTS est pilotée à l'aide du logiciel «Teststar II» en précisant des déformations moyennes sinusoïdales imposées qui varient en fonction de la température et de la fréquence. La méthode de détermination des déformations imposées sera abordée au paragraphe 2.5.2 du présent chapitre.

La presse peut être asservie de différentes manières :

- pilotage en mode de déplacement imposé à partir du capteur qui mesure les signaux de déplacement du piston. Ce mode de pilotage n'est utilisé que durant le montage de l'échantillon et, plus particulièrement, lors de la mise en contact du piston à l'axe de transmission des efforts;
- pilotage en mode de force imposée à partir du capteur de force de capacité 100 kN, ce mode de pilotage est utilisé pour les températures inférieures à $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- pilotage en mode de déformation sur la moyenne des trois extensomètres est utilisé pour des températures plus élevées supérieures à $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ lorsque les matériaux deviennent moins rigide. Un pilotage en mode de force imposée est incapable de donner des signaux de qualité pour cette plage de températures.

Au début de chaque essai, il est important d'optimiser les facteurs PIDF pour qu'on puisse avoir un meilleur signal qui s'approche au mieux à une sinusoïde. À ne pas oublier de déterminer les limites de mesures des capteurs de force et de déformation pour éviter de les briser. Il importe d'être attentif en utilisant les extensomètres car ce sont des instruments très fragiles.

2.4.2 Acquisition des données

L'acquisition des données est une opération réalisée à l'aide du programme «Teststar II», elle consiste à regrouper en 8 colonnes dans un fichier Excel, des données numériques mesurées lors des essais permettant de calculer les paramètres rhéologiques, à savoir : le temps, les signaux enregistrés par les capteurs de force, de déformation et de température ainsi que le numéro du cycle en cours (*Voir* Figure 2.18). Chaque ligne correspond à une seule acquisition (un seul point). À chaque fréquence, le logiciel est programmé à ce que le paramétrage de l'acquisition permette d'obtenir 200 points par cycle. Les données regroupées sous forme de fichier Excel sont nommées «Données brutes». À titre de rappel, les essais sont effectués sur une large gamme de températures et de fréquences : $-25, -15, -5, +5, +15, +25, +35, +45^{\circ}\text{C}$ et 0.03, 0.1, 0.3, 1, 3, 10 Hz, respectivement. Il semble très souhaitable

d'effectuer les essais des températures les plus chaudes aux températures les plus basses et des fréquences les plus basses aux fréquences les plus hautes avec deux mesures supplémentaires à 1 Hz et 0,1 Hz pour pouvoir vérifier l'évolution de la structure interne du matériau testé.

	A	B	C	D	E	F	G	H
419	Time	Force 100 kN	Capteur1	Capteur2	Capteur3	SRTD(C) moy	Force 5 kN	Axial Segments
420	Sec	N	micron	micron	micron	deg_C	N	cycles
421	1629,4454	5,5626631	-374,33447	-366,80258	-382,92093	24,138632	207,03398	35,5
422	1629,4553	8,1483126	-373,78293	-365,90625	-382,02444	24,148092	195,31253	35,5
423	1629,4652	17,629028	-373,23135	-365,07886	-381,40381	24,144037	171,86963	35,5
424	1629,4756	12,457728	-372,5419	-363,83777	-380,23151	24,125565	166,18127	35,5
425	1629,4855	23,662209	-371,71451	-362,73462	-379,33502	24,141809	176,17899	35,5
426	1629,4954	32,281071	-370,88718	-361,63141	-378,09378	24,130976	205,31023	35,5
427	1629,5052	38,314255	-369,92194	-359,90771	-376,78357	24,144297	213,75656	35,5
428	1629,5155	48,656853	-369,02563	-358,45978	-375,33542	24,145605	164,80228	35,5
429	1629,5255	39,176136	-367,85358	-356,73605	-373,74933	24,133461	165,14703	35,5
430	1629,5354	48,656853	-366,54358	-355,15024	-372,23224	24,148275	165,66417	35,5
431	1629,5453	46,933086	-365,23361	-353,35757	-370,50827	24,137512	179,79884	35,5
432	1629,5555	42,623669	-363,7168	-351,35803	-368,64636	24,142929	163,94041	35,5
433	1629,5654	52,966267	-362,26895	-349,63434	-366,71552	24,145605	164,28517	35,5
434	1629,5753	46,071201	-360,6832	-347,49692	-364,85361	24,138695	164,45755	35,5
435	1629,5852	50,380619	-359,02847	-345,63531	-363,06067	24,149588	164,80228	35,5
436	1629,5956	51,2425	-357,37375	-343,56686	-360,92291	24,13875	171,00777	35,5
437	1629,6055	48,656853	-355,65012	-341,56732	-358,9231	24,14168	143,60025	35,5
438	1629,6154	53,828152	-353,92645	-339,77466	-356,99225	24,140238	163,59567	35,5
439	1629,6252	52,966267	-352,34073	-337,43039	-354,92346	24,126745	164,45755	35,5
440	1629,6356	55,551945	-350,41022	-335,43088	-352,64783	24,148214	203,24173	35,5

Figure 2.18 Fichier de données brutes lors d'un essai ASRPG58-28/C/20
(fr=1Hz et T=25°C)

2.4.3 Traitement des données

À chaque couple (T , f_r), le fichier de données brutes est traité à l'aide du programme VBA (Visual Basic for Applications) sous forme de macros exécutées dans Microsoft Excel.

Le programme fonctionne par une itération de calculs de moindres carrés sur des sections de 2 cycles, soit 400 points. Chaque section est traitée de façon à avoir une sinusoïde qui se cale le mieux aux points mesurés expérimentalement. La méthode des moindres carrés est détaillée à l'ANNEXE II.

Les valeurs de distorsion γ et de contrainte de cisaillement τ sont assimilées à des courbes sinusoïdales dont l'équation peut s'écrire comme suit :

$$X = X_0 + X_A \sin(\omega t + \varphi) \quad (2.14)$$

Avec :

- X : contrainte de cisaillement ou distorsion,
- X_0 : moyenne de la contrainte de cisaillement ou de la distorsion,
- X_A : amplitude de la contrainte de cisaillement ou de la distorsion,
- φ : phase liée au paramètre X ,

Tous les paramètres de cette équation sont calculés avec la méthode des moindres carrés sauf la fréquence qui est fixée a priori. Les paramètres recherchés sont regroupés au Tableau 2.1.

Tableau 2.1 Paramètres recherchés et approchés par la méthode des moindres carrés pour le calcul de la distorsion et de la contrainte de cisaillement

Paramètre	Symbole
Amplitude et moyenne du signal de contrainte	τ_A et τ_0
Amplitude et moyenne du signal de distorsion pour les 3 extensomètres	γ_{Ai} et γ_{0i}
Amplitude et moyenne du signal de distorsion pour la moyenne des trois extensomètres	γ_A et γ_0
Écart des amplitudes de distorsion pour les trois extensomètres par rapport à la moyenne des distorsions	$\Delta_{\gamma i} = \frac{\gamma_{Ai} - \gamma_A}{\gamma_A}$
Écart des phases de distorsion par rapport à la phase moyenne	$\Delta_{\phi i} = \phi_i - \phi$

Pour chaque section de 200 points, l'écart relatif entre les points expérimentaux de la distorsion ou de la contrainte de cisaillement et la courbe sinusoïdale des moindres carrés est nommé «Critère K_X ». La valeur de K_X (%) est donnée par l'équation suivante :

$$K_X = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{200} \frac{|X_k^m - X_k^c|}{A_X^c} \quad (2.15)$$

Avec :

- X_k^m : grandeur mesurée au point d'acquisition k ($0 \leq k \leq 200$);

- X_k^c : grandeur calculée avec la méthode des moindres carrés;
- A_X^c : amplitude de la grandeur sur les 200 points.

Les Figures 2.19 et 2.20 illustrent des exemples de signaux approchés par la méthode des moindres carrés (MMC), la contrainte de cisaillement τ et la distorsion γ en fonction du nombre de points mesurés N .

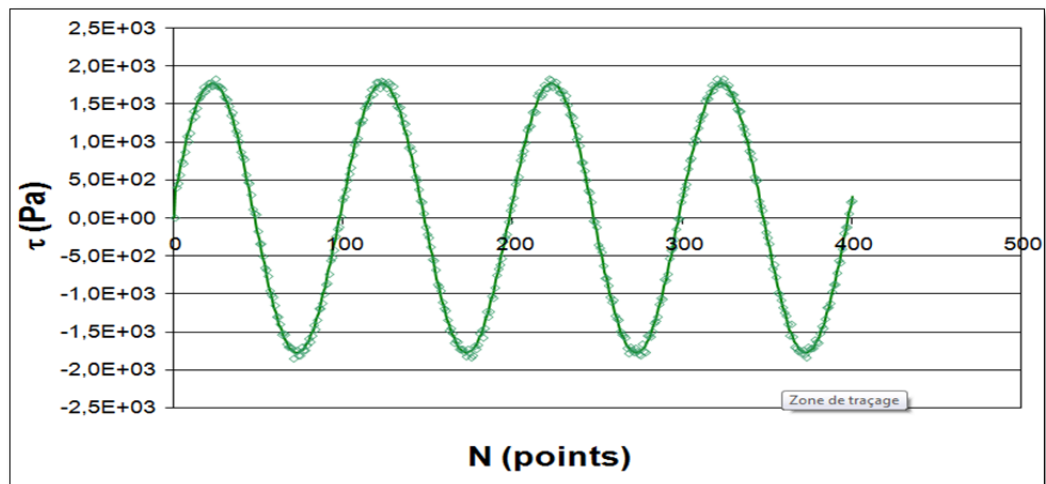


Figure 2.19 Signal de contrainte de cisaillement approché par la méthode des moindres carrés essai ASR/PG 58-28($f_r=3\text{Hz}$ et $T=25^\circ\text{C}$)

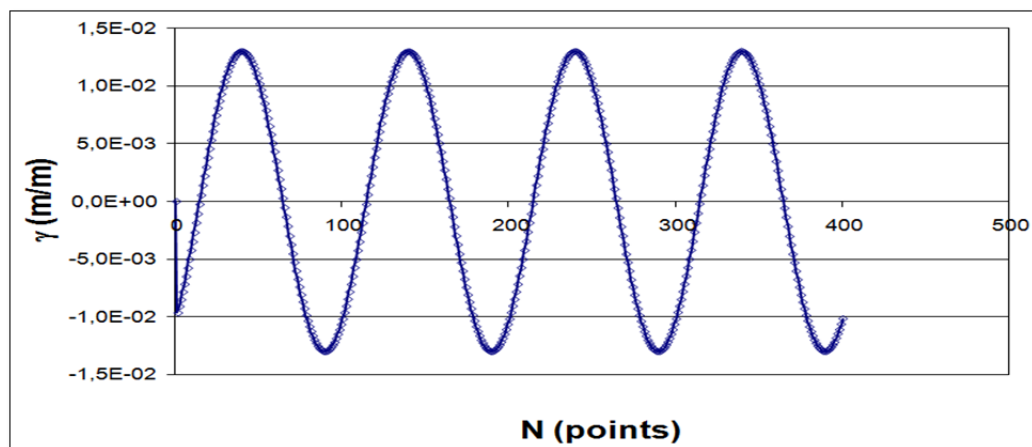


Figure 2.20 Signal de distorsion approché par la méthode des moindres carrés essai ASR/PG 58-28 ($f_r=3\text{Hz}$ et $T=25^\circ\text{C}$)

Dans le domaine viscoélastique linéaire VEL, en connaissant la valeur de la contrainte de cisaillement et de la distorsion, on peut calculer les principales caractéristiques mécaniques des matériaux testés, notamment :

- la norme du module complexe de cisaillement $|G^*| = \frac{\tau_A}{\gamma_A}$;
- l'angle de phase $\varphi_G = \varphi_\tau - \varphi_\gamma$;
- la partie réelle du module complexe de cisaillement $G_1 = \text{Re}(G^*) = |G^*| \cos(\varphi)$;
- la partie imaginaire du module complexe de cisaillement $G_2 = \text{Im}(G^*) = |G^*| \sin(\varphi)$;
- le module complexe de cisaillement $G^* = |G^*| e^{i\varphi_G}$.

2.5 Domaine de linéarité et endommagement de l'éprouvette

2.5.1 Domaine de linéarité

En tenant compte de l'hypothèse de viscoélasticité linéaire qui doit être vérifiée dans le domaine des petites déformations, les paramètres rhéologiques $|G^*|$ et φ doivent être déterminés si le comportement des matériaux est linéaire. Il convient donc de vérifier le comportement des matériaux testés tout au long de l'essai de cisaillement annulaire.

Pour ce faire, une étude de linéarité a été effectuée sur un mastic peu rigide (phase intermédiaire entre un bitume pur et un mastic hautement concentré) constitué du bitume PG 58-28 et 20% de filler de calcaire. Afin de déterminer les limites de linéarité, le matériau a été testé à différentes températures et à deux fréquences :

- de $T = +55^\circ\text{C}$ à $T = -5^\circ\text{C}$ et $f_r = 1 \text{ Hz}$;
- de $T = -15^\circ\text{C}$ à $T = -25^\circ\text{C}$ et $f_r = 0,1 \text{ Hz}$.

Il est essentiel de mentionner qu'aux basses températures ($T = -25$ à $T = -15^\circ\text{C}$), le RCA devient incapable de caractériser le comportement linéaire du matériau pour $f_r = 1 \text{ Hz}$. Cependant, pour $f_r = 0,1 \text{ Hz}$, on se retrouve au domaine linéaire.

L'étude de linéarité proposée consiste à mesurer la norme du module complexe de cisaillement $|G^*|$ à plusieurs niveaux de distorsions imposées: 0,05 %, 0,10 %, 0,15 %, 0,20 %, 0,25 %, 0,30 %, 0,40 %.... On valide la linéarité du matériau lorsque l'on remarque que la valeur de G^* reste invariable avec le niveau de distorsion. À noter que le comportement est considéré comme non linéaire une fois l'écart dépasse ± 5 % (*Voir* Figure 2.21 et 2.23). On choisit la distorsion correspondant à 5 % d'écart de module complexe ($\gamma_{lin_{95\%}}$) pour cibler la limite de linéarité, soit le plus grand taux de distorsion possible car ce dernier permet d'avoir une meilleure résolution dans les signaux (τ et γ en fonction du nombre de points enregistrés) (Perraton, 2015).

La Figure 2.21 présente un résultat type obtenu pour un mastic composé du bitume PG 58-28 et de 20% de filler calcaire et testé à ($T = +5$ °C , $f_r = 1$ Hz). La Figure 2.21 montre l'évolution relative du module complexe, exprimée en référence à la norme du module complexe mesurée au taux de distorsion le plus faible, suivant le taux de distorsion imposé. On constate que l'évolution du module complexe relatif est quasiment constante aux faibles niveaux de distorsion et donc, le comportement du liant se trouve dans le domaine linéaire. En revanche, lorsque le taux de distorsion augmente, le comportement du matériau devient non linéaire. Les résultats de la Figure 2.21 montrent que le comportement du mastic testé à 5 °C-1 Hz reste linéaire lorsque la distorsion γ est inférieure à 0,6 %.

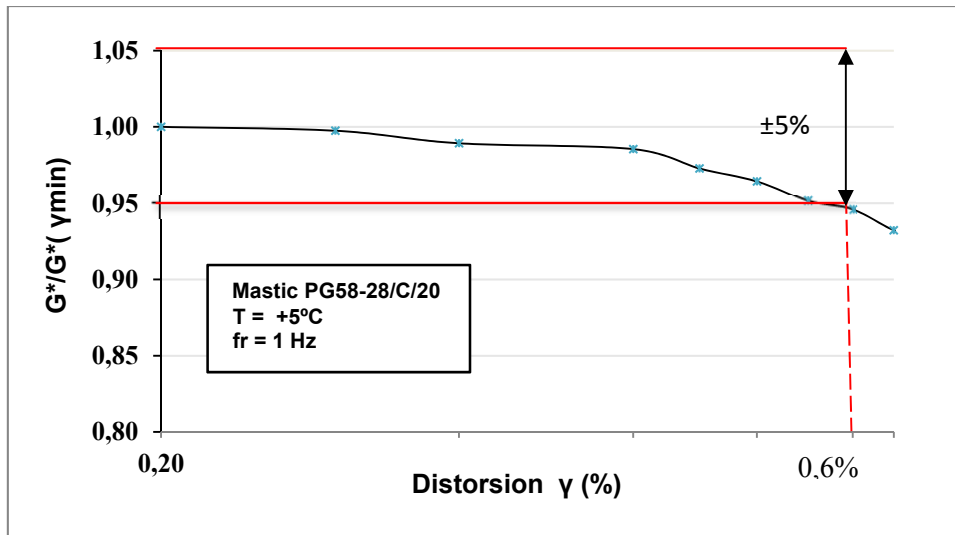


Figure 2.21 Étude de linéarité d'un mastic composé du bitume PG 58-28 et de 20 % de filler calcaire ($T = +5^\circ\text{C}$, $f_r = 1 \text{ Hz}$)

Une fois que le domaine de linéarité est déterminé, on choisit le taux de distorsion permettant de donner des signaux de qualité de τ et γ . La Figure 2.22 illustre différents signaux de τ et γ enregistrés du mastic testé à 5°C -1 Hz pour des distorsions imposées de 0,3 % et 0,6 %.

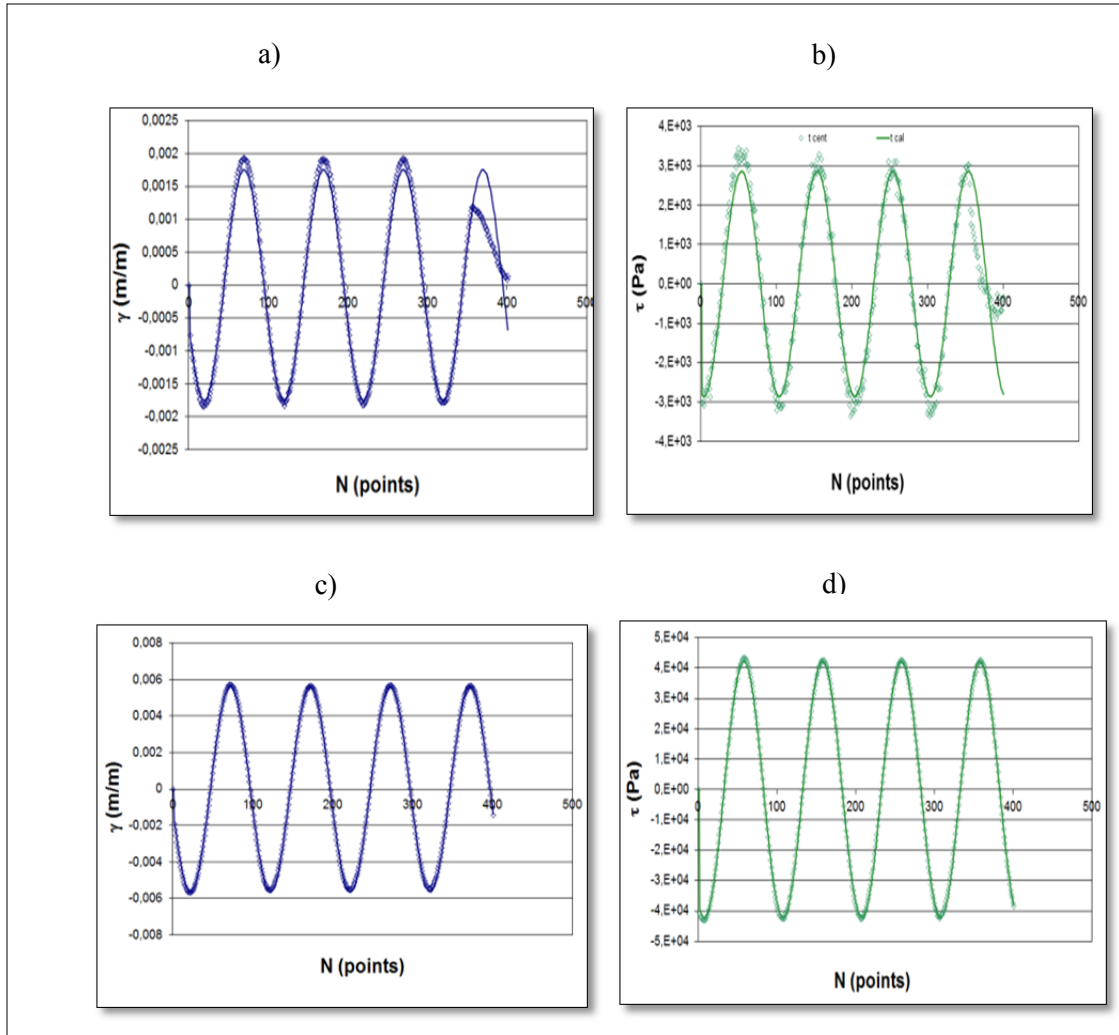


Figure 2.22 Signaux de γ et τ approchés par la MMC du mastic PG 58-28/C/20 testé à 5 °C-1 Hz a) et b) γ imposé de 0.3 % c) et d) γ imposé de 0.6 %

On remarque que les signaux obtenus à partir d'un taux de distorsion de 0,3 % sont inadéquats même si ce dernier appartient au domaine de linéarité. Par contre les signaux obtenus à partir du taux de distorsion de 0,6 % sont adéquats, ce qui permet de conclure que la limite de linéarité $\gamma_{lin_{95\%}}$ (plus grand taux possible) permet d'avoir une meilleure résolution dans les signaux enregistrés de distorsion et de contrainte de cisaillement.

La Figure 2.23 présente les résultats obtenus pour des essais réalisés à -15 °C-0,1 Hz. Les résultats montrent que le comportement du mastic reste linéaire lorsque la distorsion γ est inférieure à $\gamma_{lin_{95\%}} = 0,6 \%$.

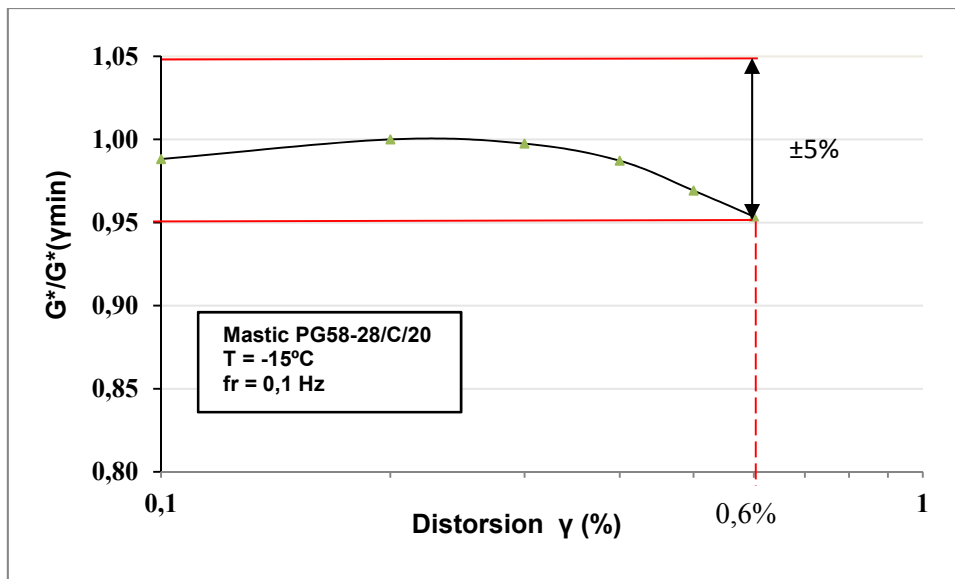


Figure 2.23 Étude de linéarité d'un mastic composé du bitume PG58-28 et de 20 % de fillers calcaire ($T = -15^\circ\text{C}$, $fr = 0,1 \text{ Hz}$)

L'ensemble des résultats obtenus pour d'autres températures est donné à l'ANNEXE III.

2.5.2 Distorsions imposées

Le Tableau 2.2 donne les différents $\gamma_{lin95\%}$ obtenus à partir des essais de linéarité présentés au paragraphe 2.5.1 sur une large gamme de températures (+55 à -25°C) à la fréquence 1Hz pour les hautes et moyennes températures et à la fréquence 0,1 Hz pour les basses températures.

Tableau 2.2 Distorsions correspondant à la limite de linéarité

T (°C)	f_r (Hz)	γ_{lin95%} (%)
+55	1	3
+45	1	2,5
+35	1	2
+25	1	1,3
+15	1	1
+5	1	0,8
-5	1	0,8
-15	0,1	0,37
-25	0,1	0,4

À partir de la valeur de distorsion obtenue à $f_r = 1$ Hz ou $f_r = 0,1$ Hz, on peut estimer les différentes distorsions imposées pour les différentes fréquences en multipliant $\gamma_{lin}(1\text{Hz})$ (la distorsion à $f_r = 1\text{Hz}$) par des coefficients obtenus à partir des amplitudes ε_{rz} données dans d'autres études de rhéologie des mastics bitumineux (Perraton, 2015). On rappelle que $\varepsilon_{rz} = \gamma/2$. Il est important de mentionner qu'on a choisi de ne pas refaire l'étude de linéarité de tous les mastics testés à condition de vérifier la qualité du signal de τ et γ obtenus à partir des distorsions imposées.

Tableau 2.3 Distorsions imposées lors de l'essai de cisaillement annulaire

f_r(Hz)	Coefficient	Distorsion imposée (%)
0,03	3	$3 \times \gamma_{lin95\%}$
0,1	1,6	$1,6 \times \gamma_{lin95\%}$
0,3	1,2	$1,2 \times \gamma_{lin95\%}$
1	1	$1 \times \gamma_{lin95\%}$
3	0,8	$0,8 \times \gamma_{lin95\%}$
10	0,4	$0,4 \times \gamma_{lin95\%}$

Les différentes distorsions imposées aux différents couples température-fréquence sont disponibles en annexes (*Voir ANNEXE IV*).

2.5.3 Endommagement de l'éprouvette

Dans cette section, on présente une méthode permettant de déterminer le Dommage apparent engendré par la Séquence de Cyclage de Sollicitation D_{scs} en fonction de chaque température de mesure lors de l'essai de cisaillement annulaire sur un mastic constitué du bitume PG 58-28 et 20 % de filler calcaire. Pour ce faire, on a testé le matériau à deux reprises à la même fréquence de sollicitation pour chaque température d'essais, soit avant la séquence de balayage des fréquences d'essai et après.

La Figure 2.24 montre le cycle de sollicitations imposé, il suffit de comparer les valeurs de $|G^*|$ mesurées à une fréquence au début (0,1 et 1 Hz dans notre cas) avec celles mesurées à la fin de l'essai (1 et 0,1 Hz retour). Il est important de mentionner que la norme française NF EN 12697-26 (AFNOR, 2004a) précise qu'une éprouvette ne sera plus utilisée pour la suite d'un essai de module complexe si l'écart de rigidité avant et après l'essai dépasse 3 %.

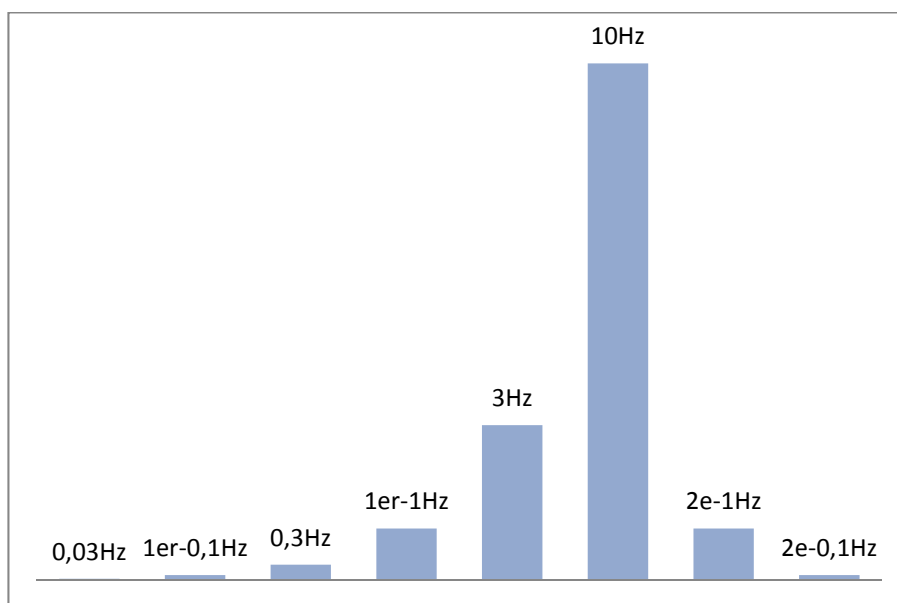


Figure 2.24 Cycle de sollicitations imposé

Le dommage apparent engendré par la séquence de cyclage de sollicitation peut s'exprimer par la relation suivante :

$$D_{scs} = 1 - \frac{|G_{Re}^*|}{|G^*|} \quad (2.16)$$

Avec :

- $|G^*|$: norme du module complexe de cisaillement mesurée à une fréquence au début de l'essai;
- $|G_{Re}^*|$: norme du module complexe de cisaillement mesurée à la même fréquence à la fin de l'essai (retour).

La Figure 2.25 décrit le dommage apparent généré par la Séquence de Cyclage de Sollicitation D_{scs} pour chaque température de mesure.

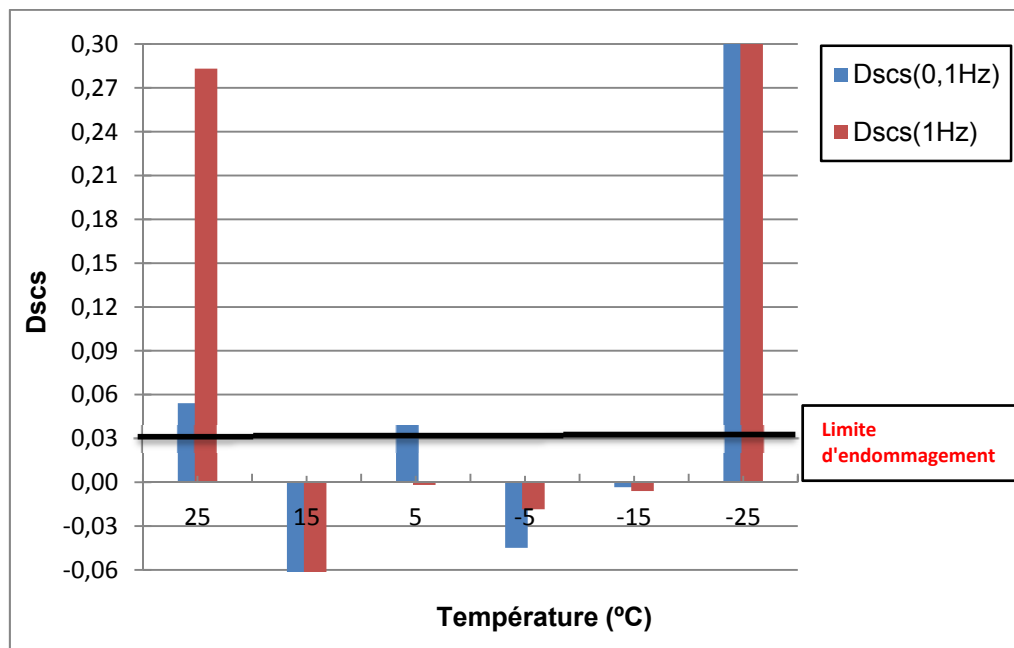


Figure 2.25 Évolution du dommage potentiellement généré par la séquence de cyclage de sollicitation (D_{scs}) par palier de température

On remarque que le matériau semble largement endommagé dans pratiquement toutes les températures pour la vitesse de sollicitation 0,1 Hz. Par contre, à la sollicitation 1 Hz, le D_{scs} se trouve sous la limite d'endommagement imposée, à moins que le matériau soit suffisamment endommagé aux isothermes (25 et -25 °C). L'endommagement de l'éprouvette de mastic est dû probablement à des taux de distorsion inadéquats. À noter que si un endommagement négatif est mesuré (soit $D_{scs} < 0$), on considère donc que le matériau testé a conservé sa rigidité plutôt qu'il a connu un gain de rigidité (Lamothe, 2014).

En guise de conclusion, si on tient compte du caractère viscoélastique des mastics bitumineux, on peut considérer que le dommage apparent est réversible. De plus, les déformations peuvent être atténuées durant le temps de repos entre chaque séquence de cyclage de sollicitation ($SCS = 180$ min). En dépit de toutes les raisons citées précédemment, nous supposons que le dommage engendré par chaque séquence de cyclage à une température donnée est irréversible et donc, cumulatif lors d'un essai de cisaillement annulaire.

CHAPITRE 3

PRÉSENTATION DU PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

3.1 Objectifs de l'étude

Le programme expérimental réalisé durant cette étude vise à caractériser la rhéologie des bitumes et des mastics bitumineux dans le domaine des petites déformations à l'aide du Rhéomètre à Cisaillement Annulaire (RCA). Les principaux objectifs de cette recherche sont :

- mettre au point un nouvel outil d'investigation utilisé au cours de ce projet afin d'étudier la rhéologie des bitumes et mastics : le Rhéomètre à Cisaillement Annulaire.
- étudier, à l'aide du RCA, l'influence du filler de verre post-consommation sur le comportement d'un mastic bitumineux. Le comportement d'un mastic constitué d'un bitume PG 58-28 et d'un filler de verre est ici comparé à celui d'un mastic conventionnel composé d'un même bitume et d'un filler de calcaire (conventionnel). Les deux types de fillers sont de même granulométrie, il s'agit des particules passant le tamis 160 μm et retenues au tamis 80 μm .
- comparer le comportement viscoélastique d'un bitume et celui d'un mastic bitumineux à partir des résultats du module complexe en cisaillement obtenus de l'essai de cisaillement annulaire.

3.2 Programme expérimental

Le Tableau 3.1 donne la synthèse des essais réalisés dans le cadre de ce projet.

Tableau 3.1 Programme expérimental

Nom de l'essai	Bitume	Fillers	%de fillers ¹	Objectif
ASR/PG 58-28	PG 58-28	Sans	0	Rhéologie du bitume pur (chapitre 4)
ASR/PG 58-28/C/40	PG 58-28	Calcaire	40	Rhéologie du mastic avec calcaire (chapitre 4)
ASR/PG 58-28/V/40	PG 58-28	Verre	40	Rhéologie du mastic avec verre (chapitre 4)
ASR/PG 58-28/C/20	PG 58-28	Calcaire	20	Étude de linéarité des mastics et endommagement de l'éprouvette (chapitre 2)
Tube/PG 58-28/C/20	PG 58-28	Verre	15	Homogénéité des mastics (chapitre 4)

¹Concentration volumique exprimée en référence au volume total.

La dénomination utilisée par la suite détermine les composants du mastic utilisé.

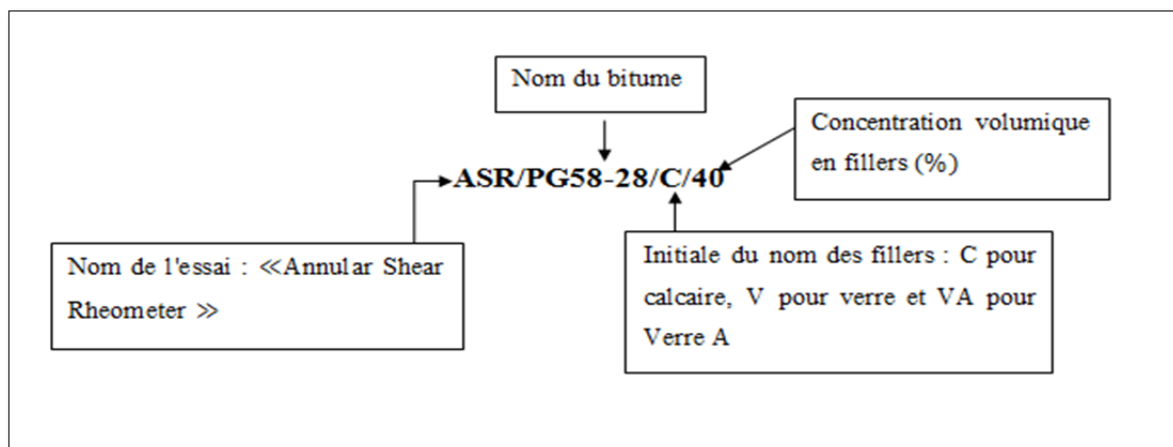


Figure 3.1 Dénomination utilisée pour les différents essais réalisés

3.3 Matériaux utilisés

Dans ce projet, plusieurs essais ont été réalisés sur différents matériaux afin de caractériser le comportement des liants et mastics bitumineux dans le domaine viscoélastique linéaire. Un bitume pur (standard) et quatre mastics constitués d'un même bitume et de différentes proportions volumiques (15, 20 et 40 %) de filler de verre ou de calcaire destinés à différents essais.

3.3.1 Bitume PG 58-28

Le bitume utilisé est un bitume de grade PG 58-28. C'est un bitume pur qui provient de la distillation du pétrole brut sans ajout de polymères. C'est le bitume le plus couramment utilisé au LCMB. Il est fourni par l'entreprise « SUNCOR Énergie ». Le certificat d'analyse et l'attestation de conformité de ce liant sont donnés à l'ANNEXE V.

3.3.2 Fillers de verre

Les fillers de verre utilisés (*Voir* Figure 3.3) sont des particules passant le tamis 160 μm et retenues au tamis 80 μm du « Verre A » utilisé au projet de maîtrise de l'étudiant Éric Lachance Tremblay (Lachance-Tremblay, 2014). Les fillers de verre sont fournis par le centre de tri « TRICENTRIS ». Le Tableau indiquant la granulométrie du « Verre A », avant tamisage, est donné à l'ANNEXE VI.

On a remarqué la présence de matières étrangères (cartons, déchets...) dans le verre A qu'on a extraites par tamisage à l'aide du tamis de 315 μm (*Voir* Figure 3.2). « [...] La présence de composants organiques parmi les granulats est à proscrire car ceux-ci sont préjudiciables à long terme aux performances de l'enrobé » (Di Benedetto et Corté, 2005).



Figure 3.2 Déchets du verre A retenus
au tamis 315 μm

3.3.3 Fillers de calcaire

Les fillers de calcaire utilisés (*Voir* Figure 3.3) sont les particules passant le tamis 160 μm et retenues au tamis 80 μm des granulats de calcaire disponibles au LCMB. Les granulats de calcaire proviennent de la carrière St-Philippe et sont fournis par l'entreprise «Construction DJL».

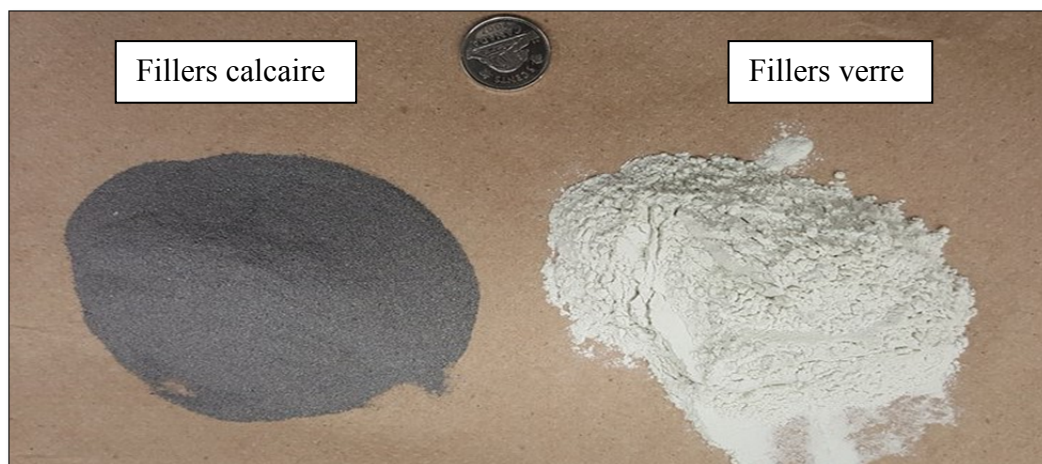


Figure 3.3 Fillers de calcaire et de verre utilisés lors des essais
(Passants 160 μm et retenus 80 μm)

CHAPITRE 4

PRÉSENTATION ET ANALYSE DES RÉSULTATS

Ce chapitre est consacré à la présentation et à l'analyse des résultats d'essais de module complexe de cisaillement effectués sur les éprouvettes de bitume et de mastic bitumineux à l'aide du rhéomètre à cisaillement annulaire de grandes dimensions (RCA). On rappelle que les résultats de cette recherche consistent à valider le bon fonctionnement du RCA, à comparer le comportement d'un bitume à celui d'un mastic bitumineux et, enfin, à étudier l'influence de la nature des fillers incorporés sur la rhéologie d'un mastic en comparant le comportement d'un mastic avec filler de verre à un mastic avec filler de calcaire dans le domaine viscoélastique linéaire VEL. Une étude d'homogénéité des mastics a été introduite au début de cette partie afin de s'assurer que les fillers ne se précipitent pas au fond du moule du RCA et restent stables au sein du mélange.

4.1 Homogénéité des mastics

4.1.1 Objet

Le mastic bitumineux est un liant composé de bitume et de filler. Bien que la structure du bitume soit hétérogène, la plupart des chercheurs traitent le bitume comme un milieu homogène vis-à-vis des fillers dans les mastics. Ils considèrent l'hypothèse d'homogénéité des mastics afin d'adapter les essais prévus initialement à la caractérisation du bitume pour celle des mastics. Une méthode d'essai a été développée afin de vérifier l'hypothèse d'homogénéité d'un mastic bitumineux. Il est important de mentionner que l'essai de cisaillement annulaire ne peut s'effectuer que sur des matériaux homogènes.

4.1.2 Principe et méthodologie

Afin de valider l'homogénéité, des mastics doivent être confectionnés au laboratoire suivant une teneur en filler contrôlée (15 % en concentration volumique), moulés suivant de fortes épaisseurs (5 cm) et coulés dans des cylindre en aluminium en vue de vérifier la variation de la concentration en filler suivant la hauteur après durcissement. Notamment, après moulage, on laisse les éprouvettes 10 heures (± 2 heures) se reposer verticalement à température ambiante (*Voir* Figure 4.1) avant de les découper en trois sections quasi - identiques (on note H pour la section du haut, M pour la section du milieu et B pour la section du Bas). De cette manière, on évaluera par la suite la teneur en filler de chaque section en calcinant le bitume à 580 °C. Cet essai est effectué sur les cinq éprouvettes afin de s'assurer de la validité des résultats. La procédure détaillée d'homogénéité des mastics est fournie à l'ANNEXE VI.



Figure 4.1 Les 5 éprouvettes pour évaluer l'homogénéité du mastic PG 58-28/VA/15

4.1.3 Résultats et conclusion

Le Tableau 4.1 donne les différentes proportions de fillers obtenues après calcination du bitume.

Tableau 4.1 Teneurs en fillers obtenues dans chaque section après calcination du bitume

Section du Tube	Teneur en fillers					Moy	Écart type	Méd	Écart reatif (%)
	1	2	3	4	5				
H	15,688	15,690	15,223	15,429	15,862	15,579	0,25	15,68	1,5
M	15,677	15,841	15,253	15,985	15,617	15,675	0,27	15,67	1,7
B	15,846	15,759	16,042	15,969	16,030	15,929	0,12	15,96	0,7

On remarque une légère augmentation de la teneur en fillers de haut en bas dans chaque section (*Voir* Tableau 4.1). Cette variation peut être en partie associée à l'imprécision de la balance et des instruments de mesure, aux pertes de bitume collé dans les parois du bécher de 500 ml lors du malaxage ou encore lors du démoulage du mastic bitumineux.

Dans les sections H et M, on retrouve pratiquement la même teneur en fillers initiale, ce qui permet de considérer que le mastic reste homogènes dans les deux premières sections. Par contre, on constate que la section B se retrouve avec une concentration en filler relativement élevée, mais l'écart reste négligeable (*Voir* Figure 4.2).

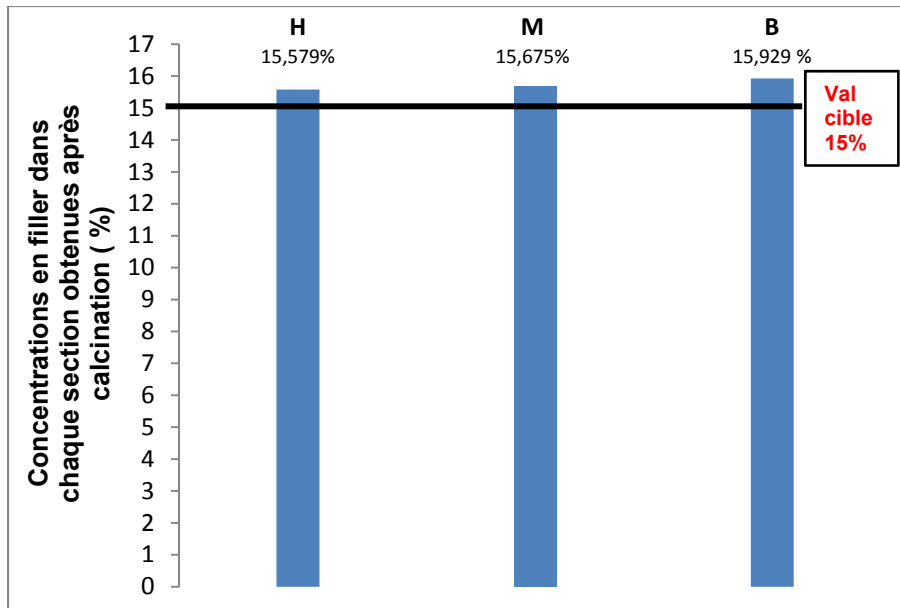


Figure 4.2 Concentrations en filler obtenues après calcination du bitume dans chaque section

En guise de conclusion, le mastic bitumineux peut être considéré comme étant un mélange homogène et ceci permet d'adapter les essais conventionnels de caractérisation des bitumes aux mastics bitumineux. À noter qu'une teneur en filler de 40 % permet d'augmenter la densification du matériau et ceci permet de supposer qu'un mastic à 40 % de filler sera plus homogène que celui à 15 %. Il est souhaitable de vérifier la migration des fillers au sein du mastic à différentes concentrations en fillers par les prochains chercheurs en se basant sur la même procédure donnée à l'ANNEXE VI.

4.2 Comportement du bitume PG 58-28 et des mastics PG 58-28/V/40 et PG 58 28/C/40 dans le domaine des petites déformations

Dans le domaine des petites déformations (VEL), le comportement thermomécanique des matériaux est caractérisé par deux paramètres, notamment : la norme du module complexe de cisaillement (module dynamique, $|G^*|$) et l'angle de phase (déphasage, ϕ). Ces derniers dépendent uniquement de la température et la fréquence de sollicitation, si le PETT est respecté en tout point de l'éprouvette.

Le modèle **2S2P1D** développé à L'ENTPE en France a été utilisé pour construire les courbes illustrant le comportement rhéologique du bitume et des mastics bitumineux testés lors de ce projet. Une procédure d'utilisation du modèle 2S2P1D (Lamothe, 2009) pour déterminer les paramètres rhéologiques des enrobés bitumineux est introduite à l'ANNEXE VII. À noter que cette procédure est valable aussi pour les liants et les mastics en changeant le module complexe $|E^*|$, en sollicitation uniaxiale, qui caractérise le comportement d'un enrobé en petites déformations par le module complexe de cisaillement $|G^*|$.

4.2.1 Le mastic PG 58-28/V/40

4.2.1.1 Courbe maîtresse (master curve)

Le module complexe dépend généralement de la température d'essai et de la pulsation ω (car $\omega = 2\pi f_r$), donc on doit écrire $G^*(\omega, T)$ sinon le résultat n'a aucun sens. En effet, à chaque température d'essai on obtient six valeurs de module complexe de cisaillement associées à six fréquences précisées précédemment au Tableau 2.2 (*Voir* Figure 4.3).

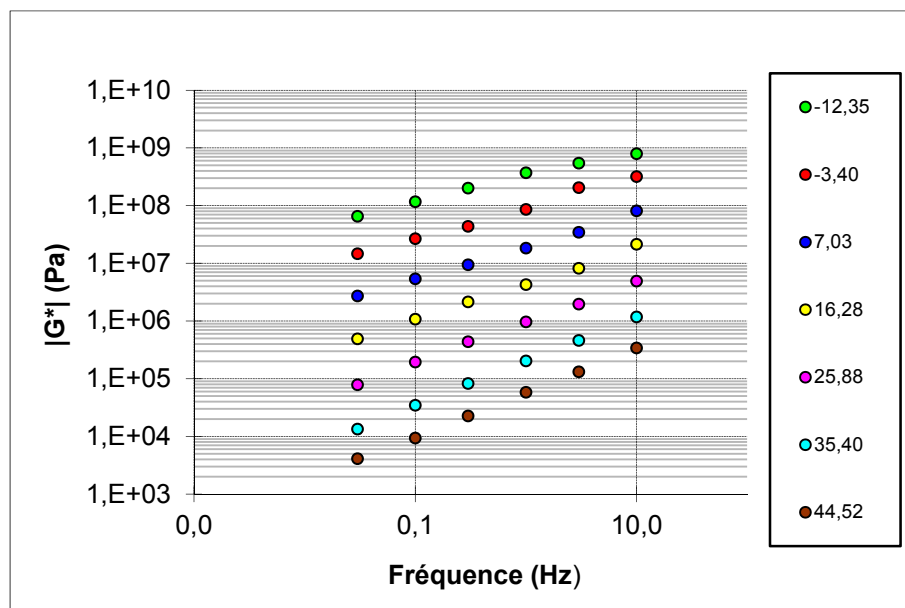


Figure 4.3 Isothermes en module (mastic PG 58-28/V/40)

Pour tracer la courbe maîtresse, courbe unique relative à une température de référence, fixée ici à **10 °C** , on translate les résultats de $|G^*|$ obtenus aux différentes températures à T_R et ceci en multipliant chaque fréquence par un coefficient de translation a_T (variable avec T) défini par l'équation suivante :

$$\log(a_T) = \frac{-C_1(T - T_R)}{C_2 + (T - T_R)} \quad (4.1)$$

Où C_1 et C_2 sont des constantes du matériau qui varient avec la température de référence T_R . Pour plus de détails, se référer au paragraphe (1.4.5).

Enfin, on arrive à traduire toutes les valeurs de module complexe de cisaillement à la fréquence équivalente $f_e = f(T_R)$ et on obtient une courbe unique comme illustrée dans les deux Figures 4.4 et 4.5.

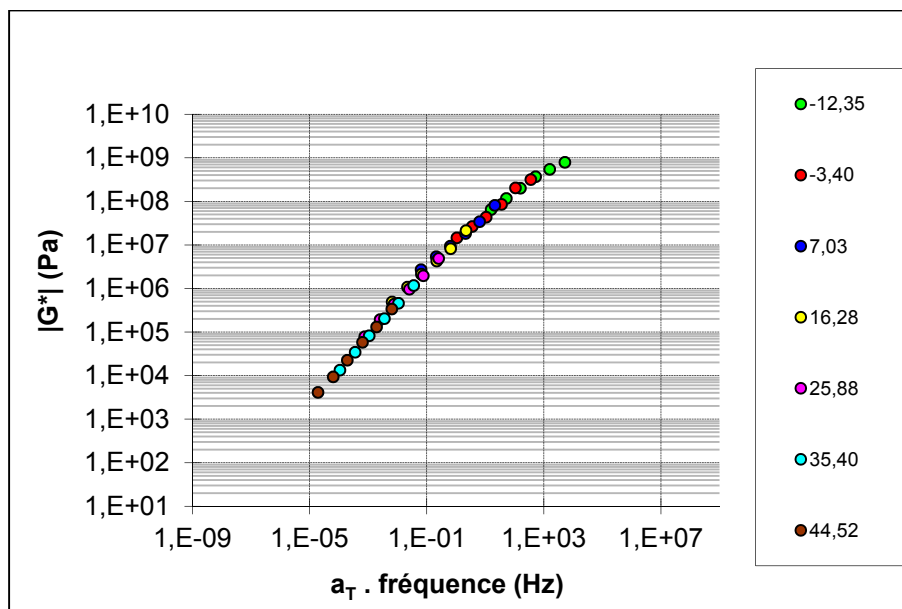


Figure 4.4 Courbe maîtresse de la norme du module complexe (mastic PG 58-28/V/40) ($T_R = 10^\circ\text{C}$)

Par ailleurs, l'angle de phase donne une idée approchée sur le comportement élastique et/ou visqueux d'un matériau viscoélastique tel que les mastics bitumineux. En effet, l'angle de phase d'un matériau purement visqueux est de 90° alors que l'angle de phase d'un matériau purement élastique est de 0° (Carter et Perraton, 2002). À la Figure 4.5, on constate que l'angle de phase du mastic en question part de 25° et chute à 72° . Ceci est dû à la présence de fillers de verre qui donnent au mastic un comportement rigide même à haute température tout en sachant qu'un bitume pur présente un comportement visqueux à haute température. On conclut donc que le mastic PG 58-28/V/40 présente un comportement viscoélastique linéaire sur toute la gamme de températures et fréquences testées.

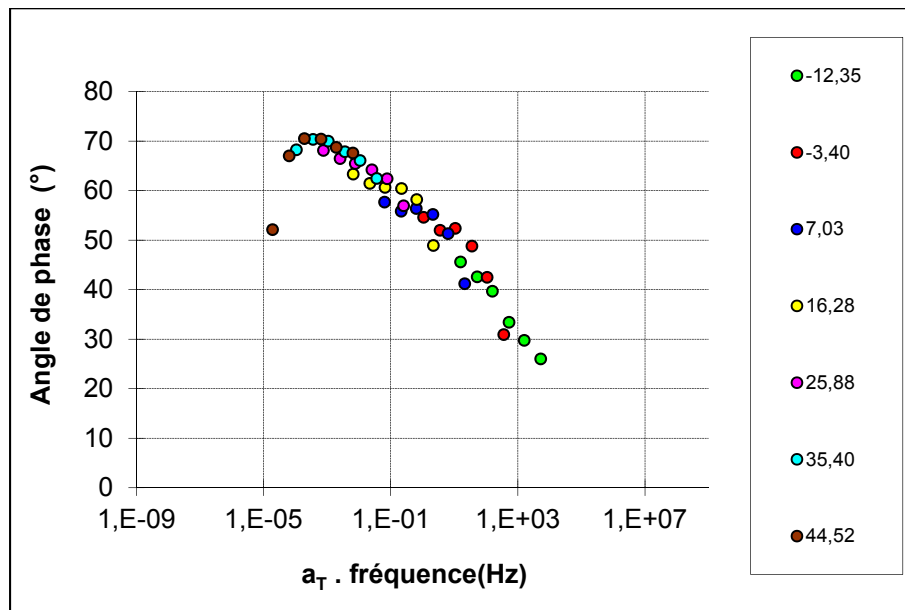


Figure 4.5 Courbe maîtresse de l'angle de phase du module complexe (mastic PG 58-28/V/40)

La courbe suivante illustre les coefficients de translation a_T en fonction des températures d'essai établie à la température de référence ($25,9^\circ\text{C}$).

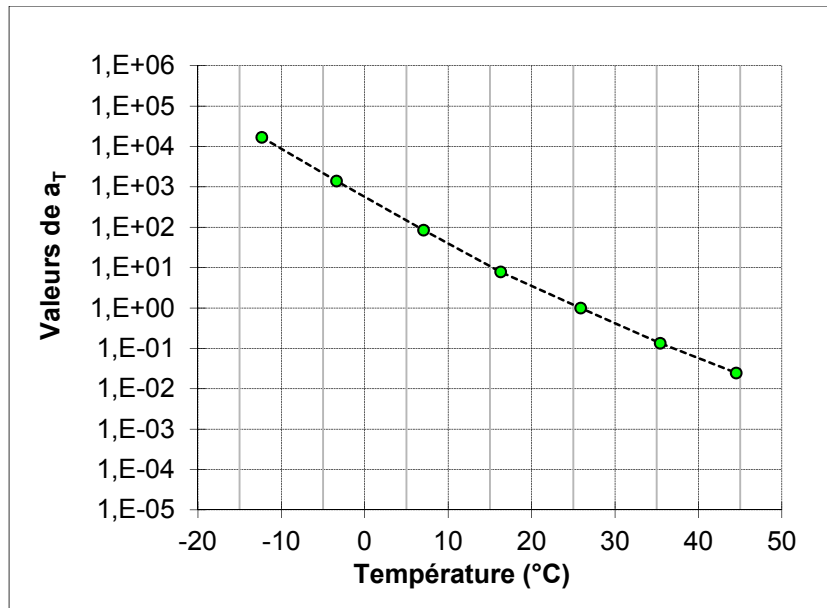


Figure 4.6 Coefficients de translation a_T
(mastic PG 58-28/V/40) ($T_R = 25.9^\circ\text{C}$)

Après avoir défini les coefficients a_T , on procède à la détermination de la courbe qui décrit le mieux les valeurs de a_T en se basant sur la loi WLF (*Voir* paragraphe 1.4.5). Pour ce faire, on cale les isothermes sur le modèle 2S2P1D comme mentionné dans la procédure d'utilisation (Annexe VII) pour que les points a_T (points verts) coïncident le plus possible avec la courbe obtenue à l'aide de la loi WLF (triangles rouges) (*Voir* Figure 4.7).

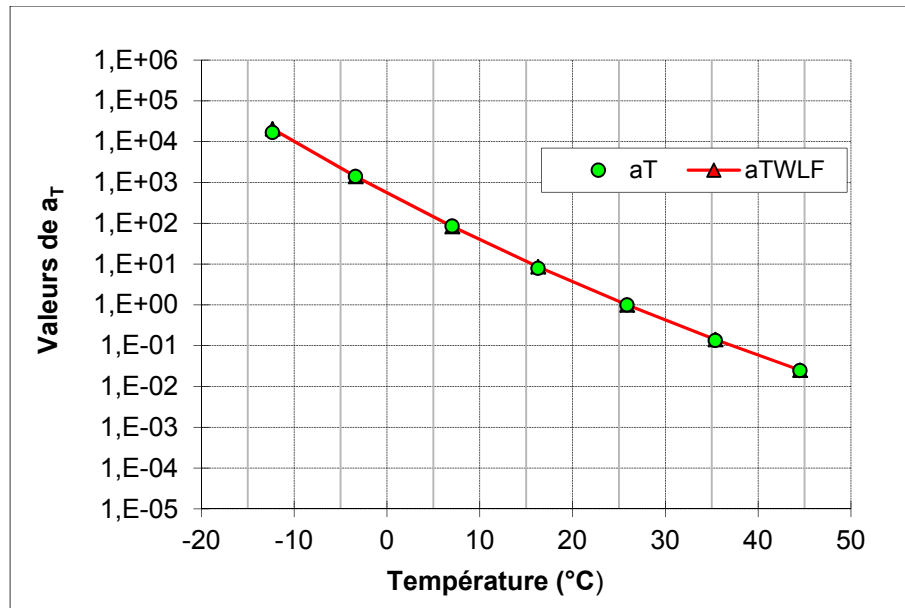


Figure 4.7 Coefficients de translation obtenus par calage
(mastic PG 58-28/V/40) ($T_R = 25.9\text{ °C}$)

On donne par la suite les valeurs de C_1 et C_2 permettant de minimiser l'écart entre les a_T et les a_{TWLF} en utilisant le solveur d'excel. Pour ce matériau $C_1 = 20,35$ et $C_2 = 218,57$ à la température de référence. On remarque que les a_T calculés et les a_T obtenus par calage sont quasiment confondus, on peut dire alors que le **matériau testé (mastic PG 58-28/V/40) vérifie bien le principe d'équivalence temps-température** (Courbe unique).

4.2.1.2 Évolution du module complexe dans le plan Cole-Cole et dans l'espace de Black

Le plan Cole-Cole vise à représenter les valeurs des parties imaginaires ($\text{Im}(G^*)$ ou G_2) des modules complexes de cisaillement en fonction des parties réelles ($\text{Re}(G^*)$ ou G_1). On rappelle que la partie réelle permet de quantifier l'énergie élastique emmagasinée tandis que la partie imaginaire quantifie l'énergie dissipée par frottement interne du aux sollicitations (Carter et Perraton, 2002).

Les mesures aux températures élevées ne sont pas bien visibles, on peut dire que cette représentation est plus significative aux moyennes et basses températures (*Voir* Figure 4.8).

Comme cité à la revue de littérature, le plan Cole-Cole est composé d'un ensemble de points constituant une cloche (ou demi-cercle) allant de l'origine du graphique correspondant aux mesures à des températures élevées jusqu'à l'intersection avec l'axe des abscisses. Ce point d'intersection, noté G_0 , est appelé module infini.

La détermination graphique de G_0 demeure quasiment impossible car notre enceinte thermique, permettant de réguler la température au cours de l'essai de cisaillement annulaire, est incapable d'effectuer des mesures aux très basses températures en plus de l'endommagement des éprouvettes à cause du cisaillement à des températures généralement inférieures à $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

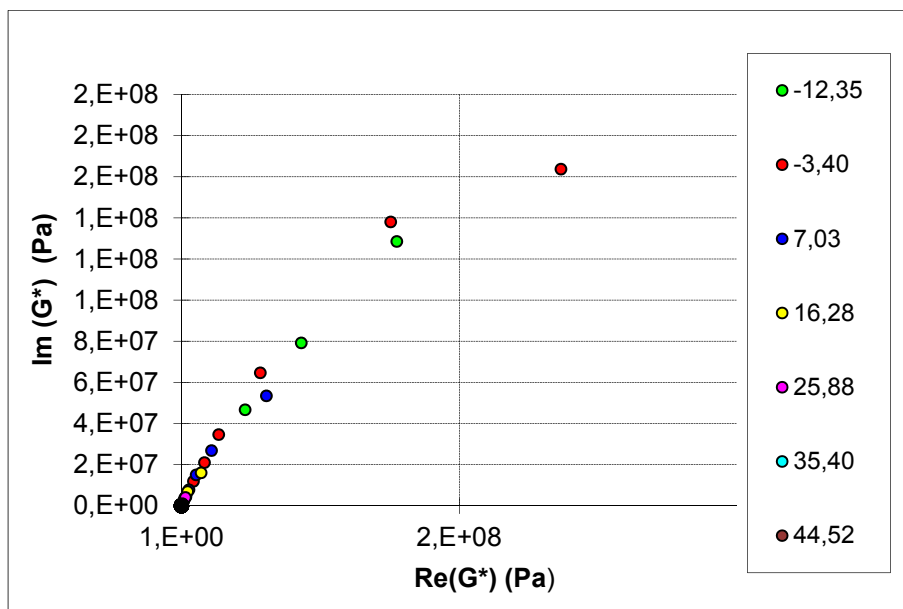


Figure 4.8 Représentation du module complexe dans le plan Cole-Cole (mastic PG 58-28/V/40)

L'espace de Black consiste à représenter les différentes valeurs du module dynamique $|G^*|$ en fonction de l'angle de phase φ . Contrairement au plan Cole-Cole, tous les points mesurés sont visibles sur toute la gamme de températures (*Voir* Figure 4.9). Il est important de

mentionner que cette représentation (espace de Black) peut être appelée "courbe maîtresse" dans certains ouvrages.

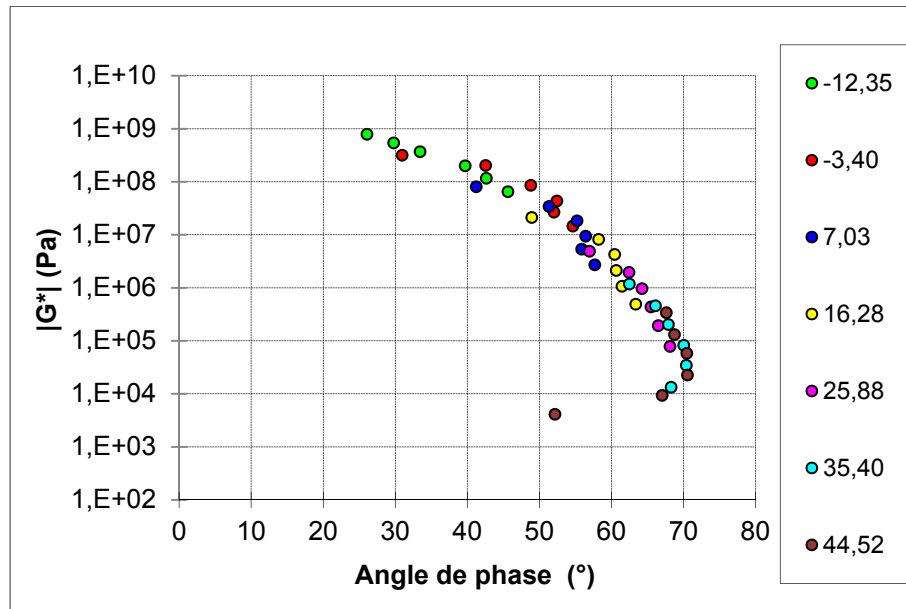


Figure 4.9 Représentation du module complexe dans l'espace de Black (mastic PG 58-28/V/40)

Puisque tous les points illustrés dans le plan Cole-Cole et l'Espace de Black se superposent et forment une seule courbe, on dit que le mastic PG 58-28/V/40 vérifie le principe d'équivalence temps-température (PETT).

4.2.2 Le mastic PG 58-28/C/40

4.2.2.1 Courbes maîtresses

Le mastic PG 58-28/C/40 a été testé de 44,5 à -3,5 °C. En effet, l'essai s'est arrêté à -3,5 °C car il est incapable d'effectuer le cisaillement aux basses températures. La Figure 4.10 donne à chaque température d'essai, six valeurs de modules complexes de cisaillement associées aux fréquences d'essai.

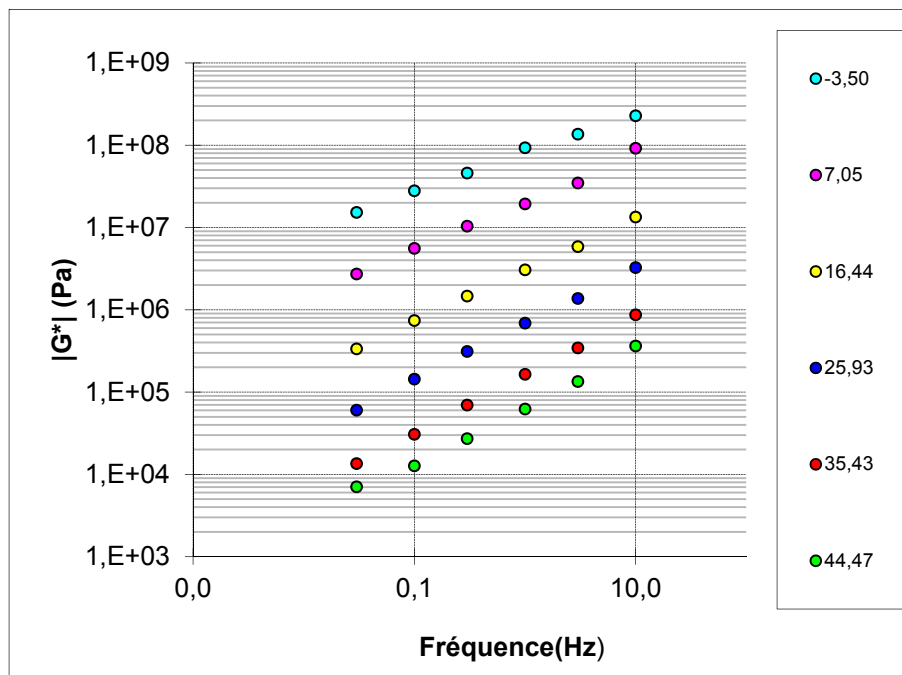


Figure 4.10 Isothermes en module (mastic PG 58-28/C/40)

On translate par la suite toutes les valeurs du module complexe de cisaillement à la fréquence équivalente $f(T_R=10\text{ }^{\circ}\text{C})$ afin de tracer la courbe maîtresse en module (*Voir* Figure 4.11). Pour ce faire, on multiplie chaque fréquence par le coefficient de translation a_T . Les valeurs de a_T pour ce mastic seront données par la suite. La courbe maîtresse obtenue est une courbe unique, on peut dire que le matériau vérifie le PETT.

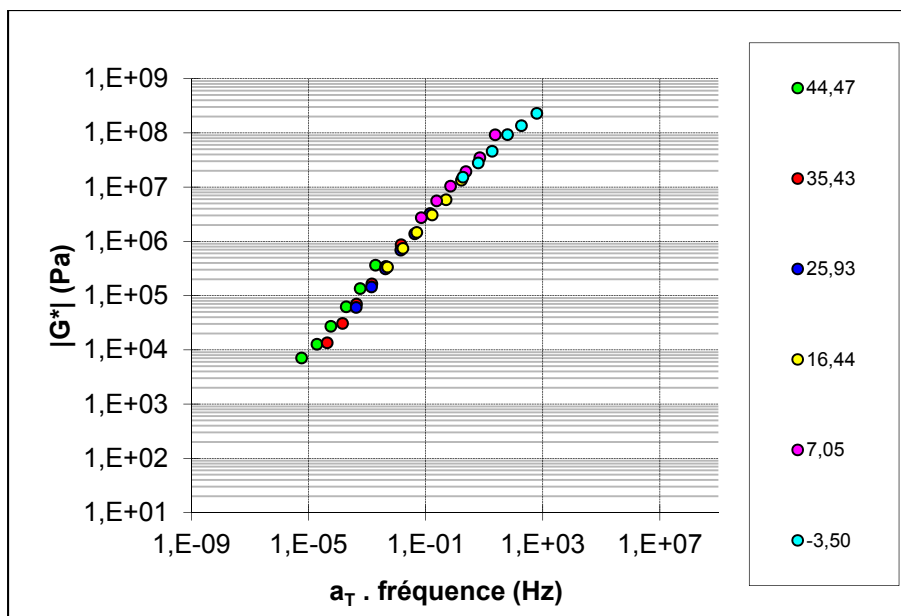


Figure 4.11 Courbe maîtresse de la norme du module complexe
(mastic PG 58-28/C/40) ($T_R = 10^\circ\text{C}$)

De la même manière, on trace la courbe maîtresse de l'angle de phase à partir des isothermes en angle de phase en utilisant les mêmes coefficients de translation (*Voir* Figure 4.12). On remarque que les angles de phase du mastic PG 58-28/C/40 partent de 30° et **chutent** à 69° à cause de la présence de fillers de calcaire qui augmentent la rigidité du mastic aux hautes températures. On peut conclure que sur toute la gamme de températures et de fréquences, ce mastic présente un comportement viscoélastique linéaire.

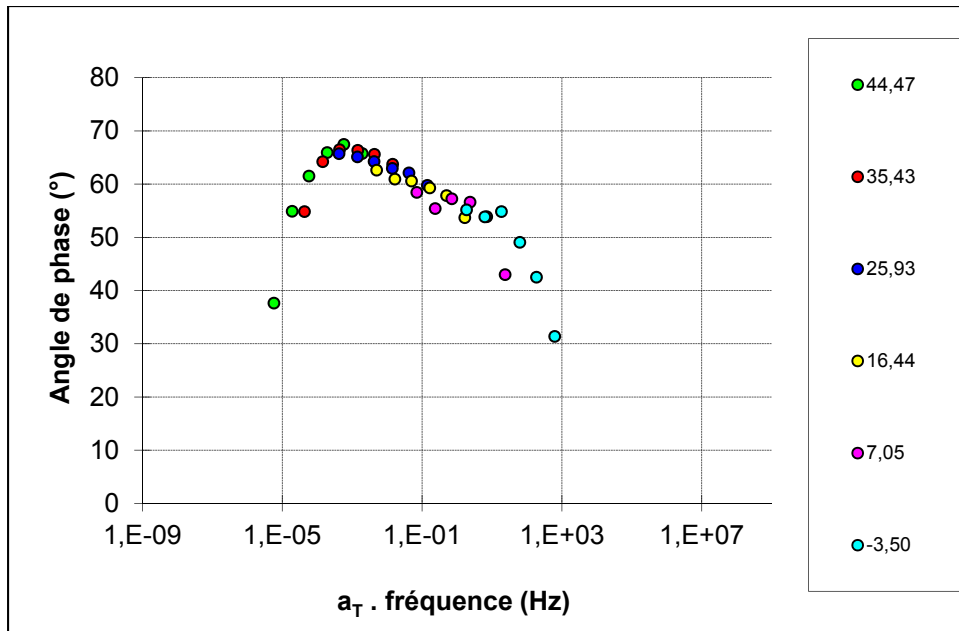


Figure 4.12 Courbe maîtresse de l'angle de phase
(mastic PG 58-28/C/40) ($T_R = 10\text{ °C}$)

4.2.2.2 Évolution du module complexe dans le plan Cole-Cole et dans l'espace de Black

La Figure 4.13 illustre l'évolution du module complexe dans le plan Cole-Cole. Cette représentation est significative surtout pour les basses températures et hautes fréquences (les mesures aux hautes températures sont peu visibles). Le module infini (G_0) n'est pas visible dans cette représentation car notre montage ne permet pas les sollicitations aux très basses températures, de plus l'essai s'est arrêté à $-3,5\text{ °C}$ comme cité précédemment.

La Figure 4.14 présente l'évolution de la norme du module complexe en fonction de son angle de phase. L'échelle du module complexe étant logarithmique, ce qui permet de présenter l'évolution du module complexe sur toute la gamme de températures, chose quasiment impossible dans le plan Cole-Cole.

Les points illustrés sur les Figures 4.13 et 4.14 forment des courbes uniques et continues, on peut dire que le mastic PG 58-28/C/40 vérifie assez bien le PETT.

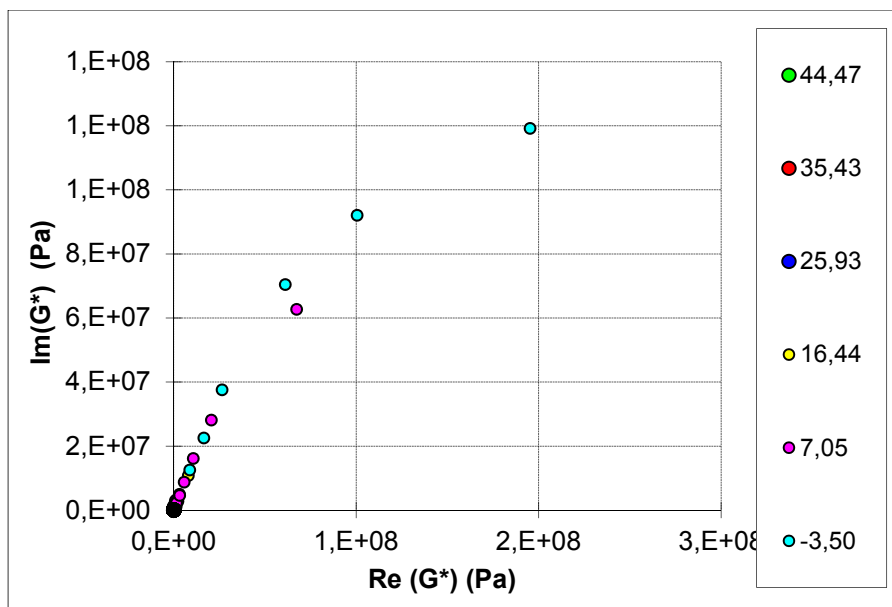


Figure 4.13 Représentation du module complexe dans le plan Cole-Cole (mastic PG 58-28/C/40)

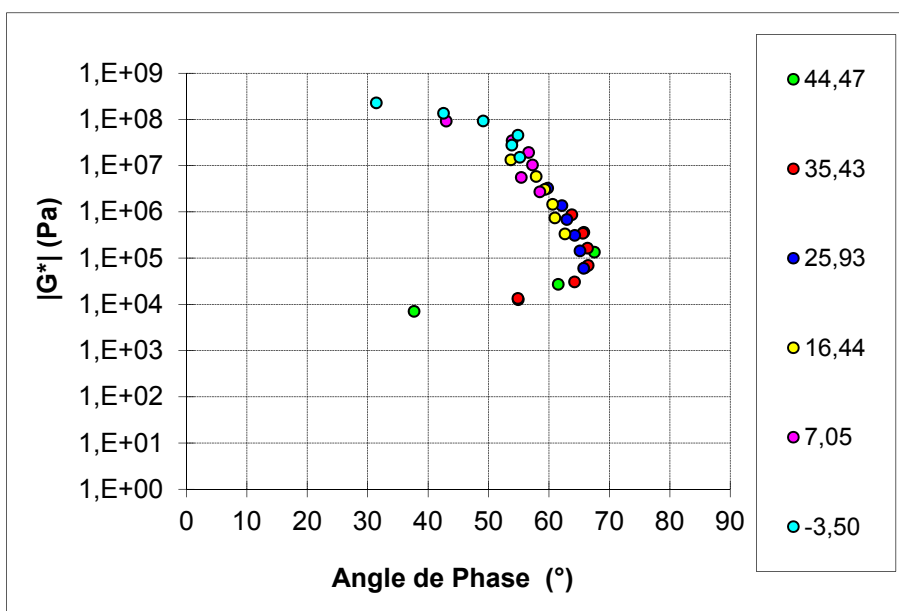


Figure 4.14 Représentation du module complexe dans l'espace de Black (mastic PG 58-28/C/40)

4.2.3 Le bitume PG 58-28 (liant seul sans fillers)

Dans cette section, nous présentons les courbes caractéristiques du liant standard PG 58-28 testé à l'aide du RCA sur une plage de températures de -13,6 à 33,9 °C. Le rhéomètre était incapable d'effectuer des mesures de modules complexes aux hautes températures car le bitume a flué sous l'effet de son poids propre. On rappelle que ce problème a été surmonté par la suite après l'installation du dispositif de mise en pression au bas de l'éprouvette testée ce qui empêche le bitume ou le mastic de s'écouler (*Voir* paragraphe 2.3.4). Des courbes caractéristiques de deux liants utilisés en France ont été fournies dans ce chapitre afin de comparer la rhéologie de notre bitume standard avec ceux utilisés au laboratoire de l'ENTPE. Il s'agit du 50/70, bitume classique très courant et du B4 bitume structuré qui a été modifié par l'ajout de polymères (Van Rompu et Di Benedetto, 2006).

4.2.3.1 Courbes maîtresses

La Figure 4.15 donne pour chaque température d'essai les six valeurs de modules complexes de cisaillement associées aux fréquences d'essai.

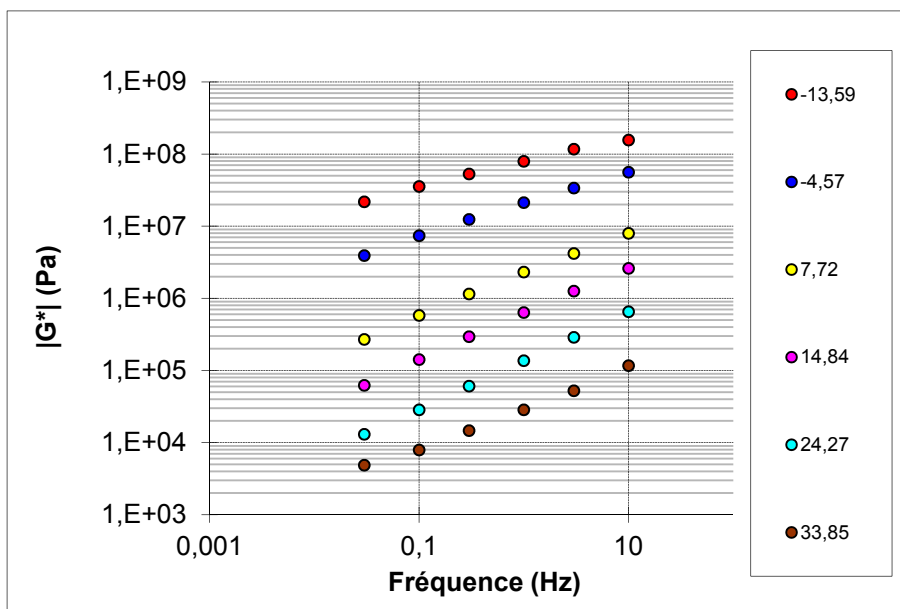


Figure 4.15 Isothermes en module (bitume PG 58-28)

On translate toutes les valeurs du module complexe de cisaillement à la fréquence équivalente $f(T_R = 10\text{ °C})$ afin de tracer la courbe maîtresse en module (*Voir Figure 4.16*). Les valeurs des coefficients de translation a_T pour ce liant seront fournies par la suite. La courbe maîtresse obtenue est une courbe unique continue, on dit que le liant PG 58-28 vérifie bien le PETT.

On remarque que l'allure du PG 58-28 et celle du bitume 50/70 et B4 sont similaires d'où le bon fonctionnement de notre dispositif expérimental, à moins que les bitumes français semblent plus rigides que notre bitume standard, chose qui a été affirmée par les anciens chercheurs. En effet, les bitumes utilisés au Québec sont plus mous que ceux utilisés en France (Lamothe, 2009).

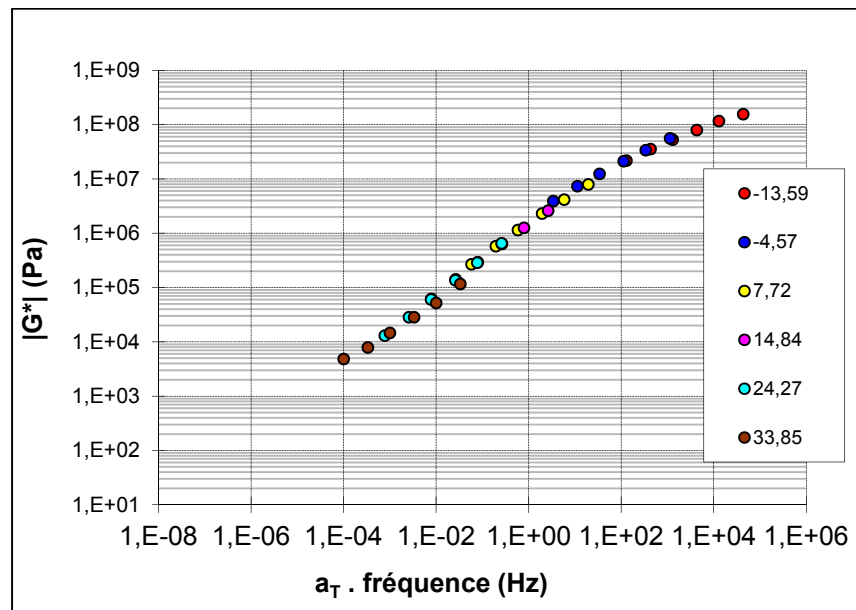


Figure 4.16 Courbe maîtresse de la norme du module complexe (bitume PG 58-28) ($T_R = 10\text{ °C}$)

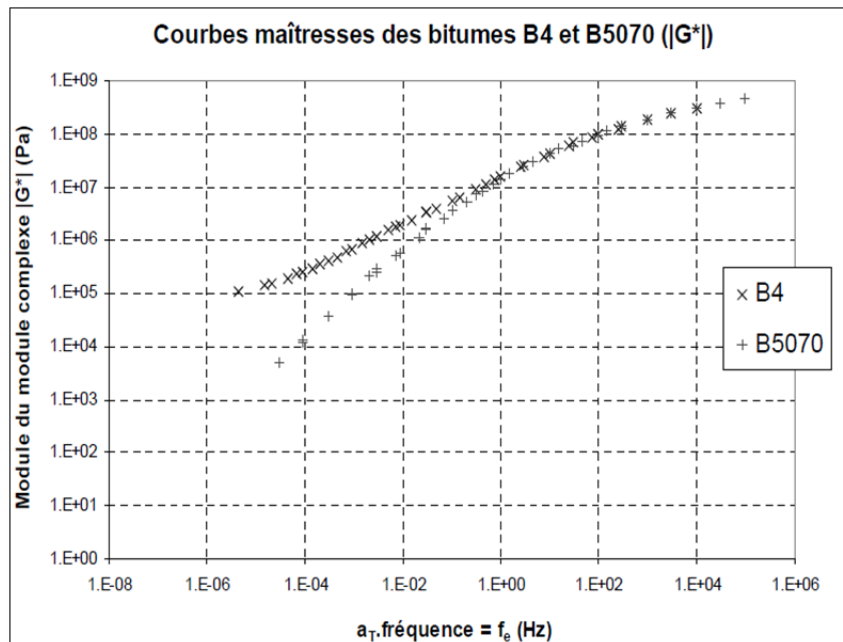


Figure 4.17 Courbes maîtresses des bitumes B4 et B5070
Tirée de Van Rompu et Di Benedetto (2006)

On trace la courbe maîtresse de l'angle de phase à partir des isothermes en angle de phase en utilisant les mêmes coefficients de translation. On remarque que les angles de phase du bitume PG 58-28 partent de 20° et chutent à 62° . On peut conclure que sur toute la gamme de températures et de fréquences, ce bitume présente un comportement viscoélastique linéaire. À partir des Figures 4.16 et 4.18, on constate que la viscosité augmente quand la rigidité diminue, c'est l'une des propriétés essentielles des matériaux viscoélastiques.

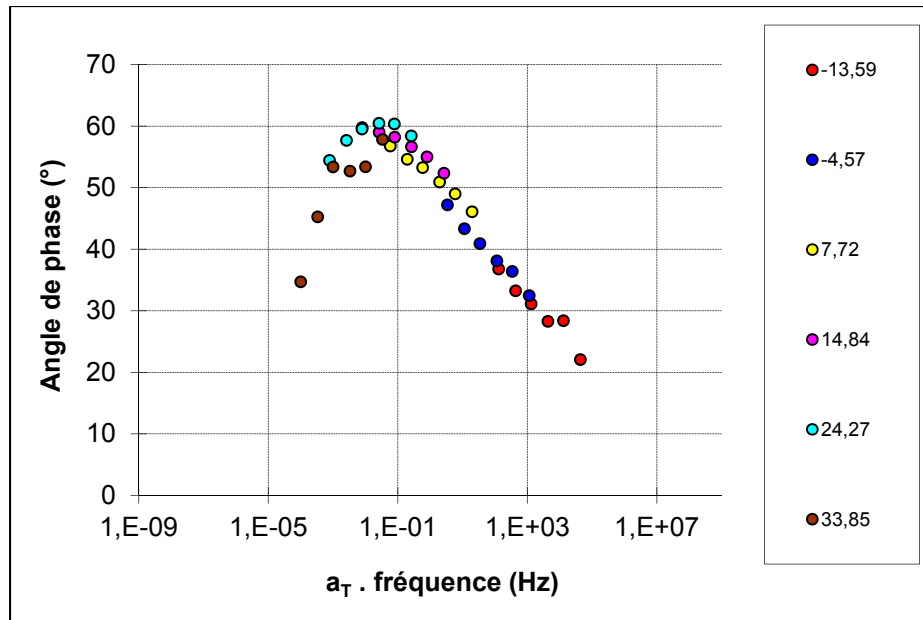


Figure 4.18 Courbe maîtresse de l'angle de phase
(bitume PG 58-28) ($T_R = 10\text{ °C}$)

4.2.3.2 Évolution du module complexe dans le plan Cole-Cole et dans l'espace de Black

La Figure 4.19 illustre l'évolution du module complexe dans le plan Cole-Cole. Les mesures aux hautes températures ne sont pas bien visibles. Le module infini (G_0) n'est pas visible dans cette représentation.

La Figure 4.20 représente l'évolution de la norme du module complexe en fonction de son angle de phase dans l'espace de Black. L'échelle du module complexe étant logarithmique, ce qui permet de présenter l'évolution du module complexe sur toute la gamme de températures. On obtient une courbe unique continue, on dit que le bitume vérifie bien le PETT.

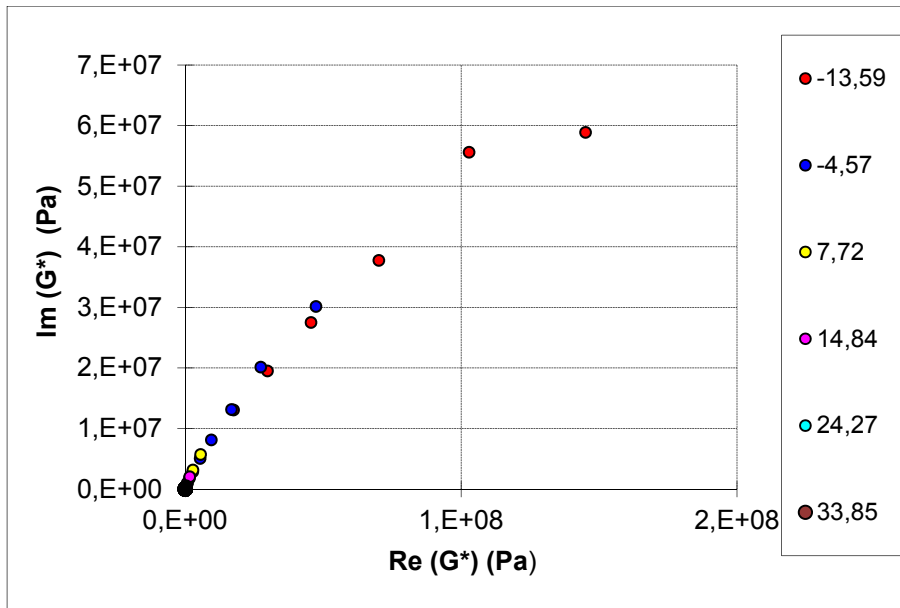


Figure 4.19 Représentation du module complexe dans le plan Cole-Cole (bitume PG 58-28)

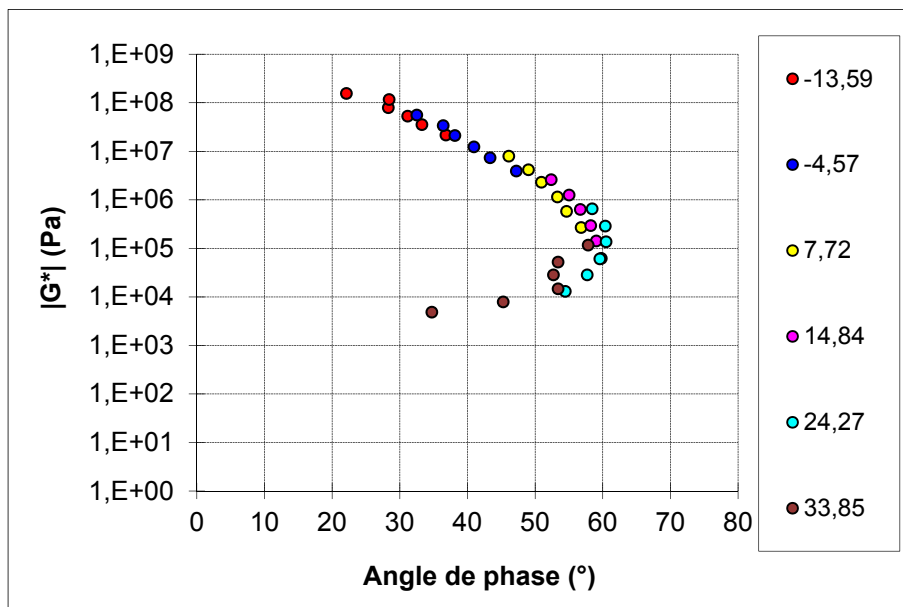


Figure 4.20 Représentation du module complexe dans l'espace de Black (bitume PG 58-28)

4.3 Différences entre mastic et bitume (ex de mastic PG 58-28/V/40 et bitume PG 58-28)

Les chercheurs ont mentionné qu'un mastic bitumineux est plus rigide que le bitume dont il est composé (*Voir* paragraphe 1.6.2.3). En effet, plus on augmente la concentration en fines, plus on rigidifie le comportement du liant et ceci entraîne un meilleur comportement de l'enrobé vis à vis de l'orniérage et de la déformation à haute température.

À l'aide du rhéomètre à cisaillement annulaire, on a pu constater que le mastic PG 58-28/V/40 présente un meilleur comportement rhéologique par rapport au bitume PG 58-28 sur toute l'étendue de températures. Ce résultat est observable sur la Figure 4.21. En effet, la courbe maîtresse de la norme du module complexe de cisaillement se trouve au-dessus de celle du bitume. Ceci peut être expliqué par la présence de fillers de verre qui absorbent les huiles et forment ce qu'on appelle un squelette granulaire constitué de fillers-résines-asphaltènes, ce dernier consiste à améliorer le comportement du liant et le rend plus rigide.

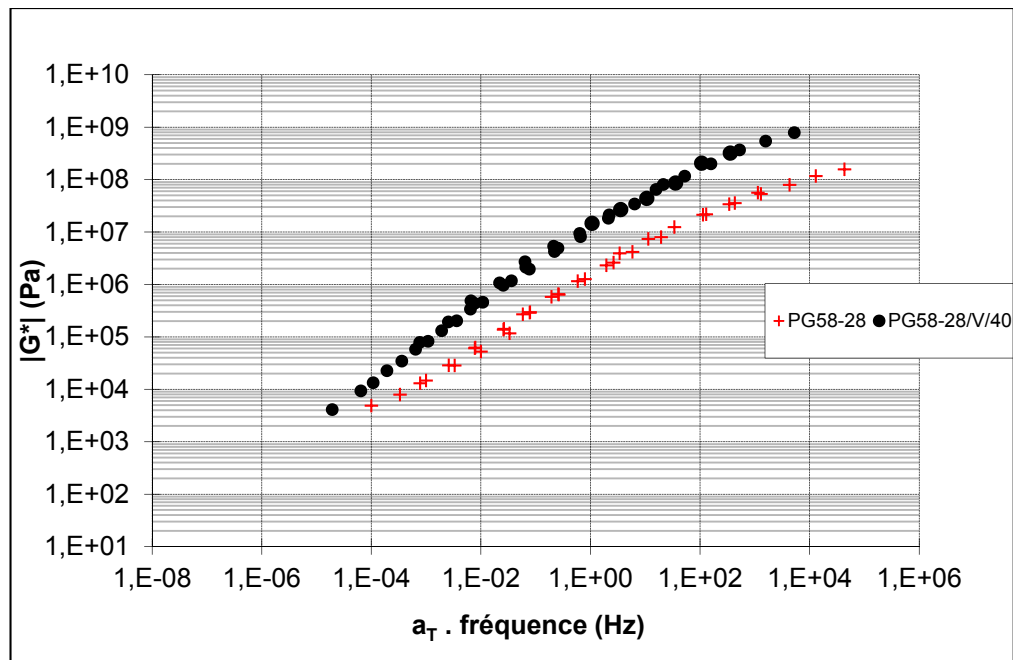


Figure 4.21 Courbes maîtresses de la norme du module complexe du PG 58-28/V/40 et du PG 58-28 ($T_R = 10$ °C)

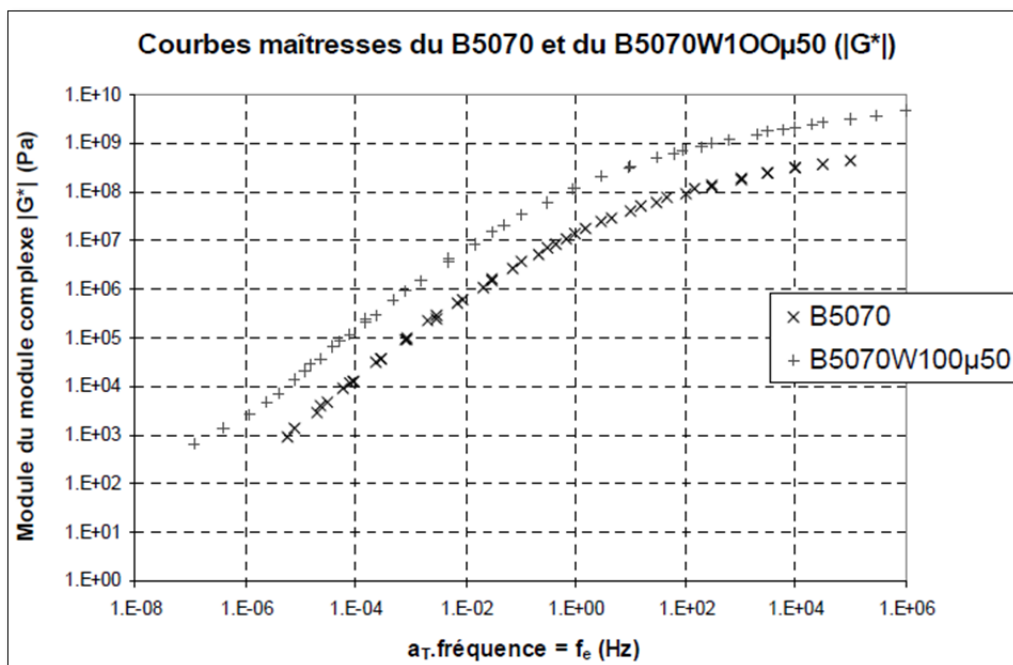


Figure 4.22 Courbes maitresses en module du B5070 et B5070W100μ50
Tirée de Van Rompu et Di Benedetto (2006)

Sur la Figure 4.23, on remarque qu'à des températures élevées et basses fréquences, l'angle de phase chute et tend vers 0 °C (ce phénomène est peu visible sur la Figure car on n'est pas allé aux très hautes températures à cause du fluage du matériau testé sous l'effet de la gravité). Ceci est dû à la composante élastique introduite à cause du contact entre les particules de verre aux hautes températures. Par ailleurs, des études préalables affirment que la courbe de $|G^*|$ change de pente aux très basses fréquences et hautes températures. De plus, ce changement de pente correspond à un pic d'angle de phase (Soenen et Teugels, 1999). Ces deux résultats ont été confirmés dans notre projet (*Voir* Figures 4.21 et 4.23).

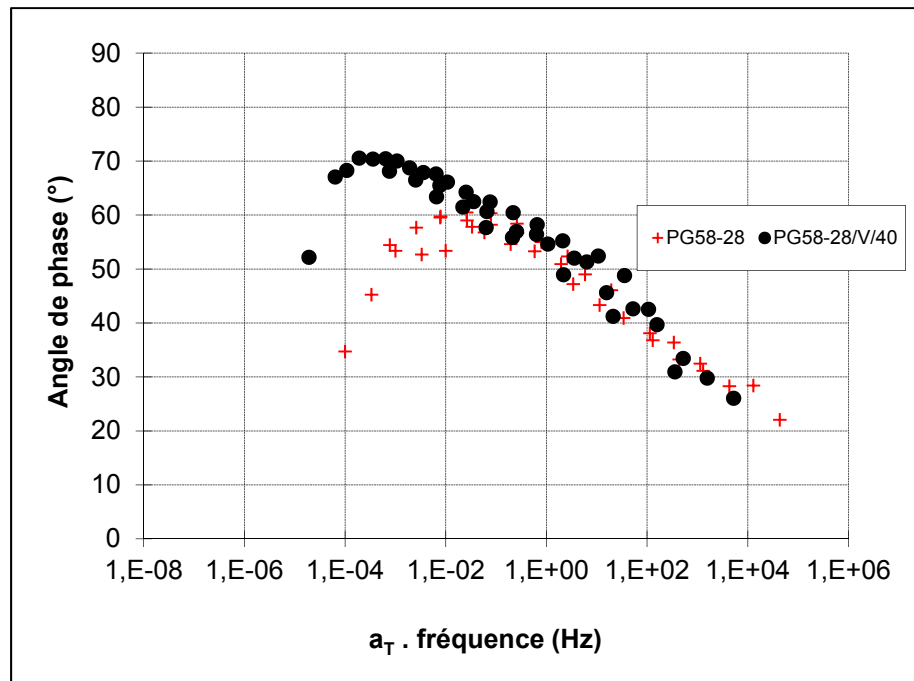


Figure 4.23 Courbes maîtresses de l'angle de phase du PG 58-28/V/40 et du PG 58-28 ($T_R=10^\circ\text{C}$)

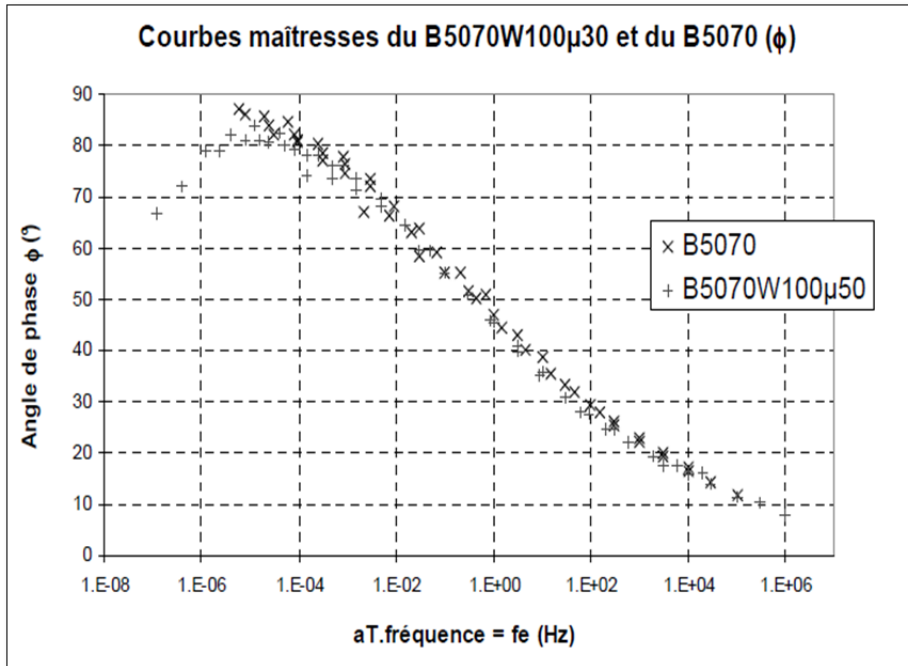


Figure 4.24 Courbes maîtresses de l'angle de phase du B5070 et B5070W100μ50
Tirée de Van Rompu et Di Benedetto (2006)

4.4 Différences entre le mastic PG 58-28/V/40 et le mastic PG 58-28/C/40

Comme déjà cité au paragraphe 1.6.2.2, la nature des fillers influence le comportement des mastics bitumineux. En effet, il existe deux sortes de fillers : des fillers actifs qui améliorent le comportement du mastic et donc, de l'enrobé et des fillers inertes qui n'ont aucune interaction avec le bitume.

La Figure 4.25 illustre le comportement en module complexe de cisaillement des deux mastics PG 58-28/V/40 et PG 58-28/C/40 sur une gamme de températures de : -12,4 à 44,5 °C pour le mastic avec verre et de -3,5 à 44,5 °C pour le mastic avec calcaire.

On peut distinguer trois domaines :

- $[35\text{ °C} ; 45\text{ °C}]$: pour les hautes températures, le mastic avec calcaire est plus rigide que le mastic avec verre. En effet, le squelette granulaire de calcaire qui reprend la majorité des forces à des températures élevées est probablement plus solide que celui en verre. Enfin, le mastic avec calcaire présente un meilleur comportement que le mastic avec verre vis à vis de l'orniérage et de la déformation sur cette gamme de températures;
- $[-3,5\text{ °C} ; 35\text{ °C}]$: Pour les températures intermédiaires, les deux mastics ont des comportements semblables en terme de rigidité;
- $[-12\text{ °C} ; -3,5\text{ °C}]$: Pour les basses températures, le mastic avec verre est plus rigide que le mastic avec calcaire mais l'écart de rigidité reste négligeable, donc on peut considérer que les deux matériaux sont quasi-semblables en terme de rigidité sur cette gamme de températures.

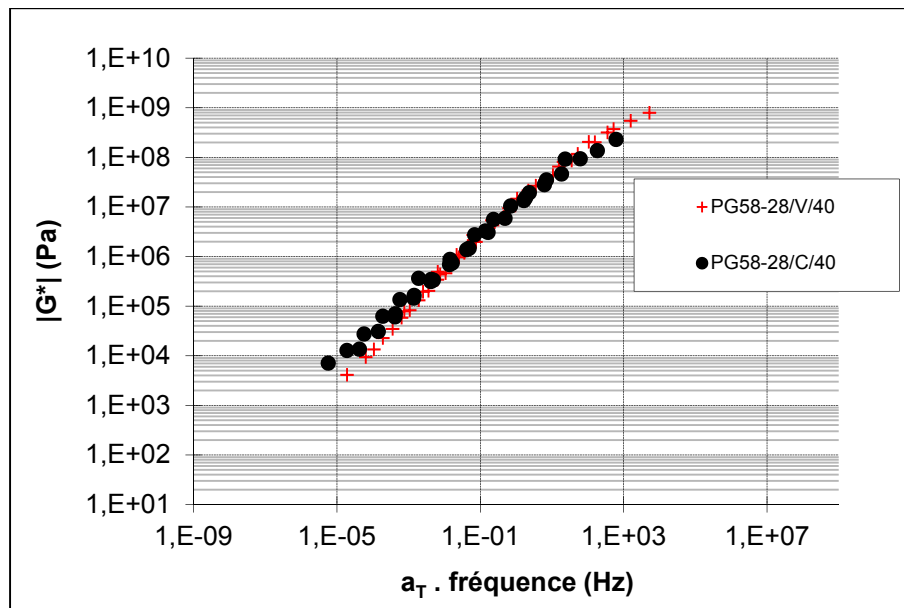


Figure 4.25 Courbes maîtresses de la norme du module complexe du PG 58-28/V/40 et du PG 58-28/C/40 ($T_R = 10\text{ °C}$)

La Figure 4.26 représente l'évolution de l'angle de phase en fonction de la fréquence de sollicitation. On constate qu'aux hautes températures (supérieures à 25 °C) le mastic avec verre se comporte comme un matériau visqueux quasi-pur (angle de phase tend vers 72 °).

Pour les moyennes et basses températures les angles de phases des deux matériaux évoluent de la même manière. Par ailleurs, aux hautes températures et/ou basses fréquences les angles de phases des deux mastics chutent avec une diminution de la pente de $|G^*|$.

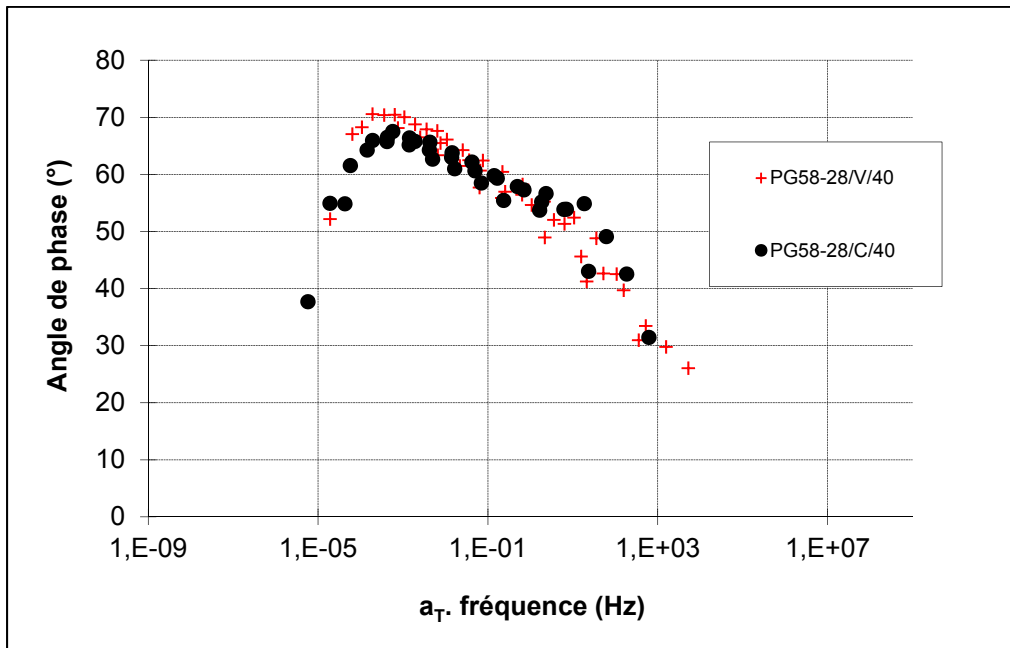


Figure 4.26 Courbes maîtresses de l'angle de phase du PG 58-28/V/40 et du PG 58-28/C/40 ($T_R = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$)

4.5 Écarts des modules complexes des matériaux

Dans les paragraphes 4.3 et 4.4, on a présenté les écarts en terme de rigidité des différents matériaux testés à l'aide du RCA. Certes, l'écart de rigidité entre les matériaux est observable sur certaines gammes de températures et de fréquences, mais peu visible sur d'autres intervalles.

Pour surmonter ce problème, on définit un coefficient complexe (C^*) appelé : Coefficient complexe de renforcement. Ce paramètre consiste à évaluer l'effet de l'ajout des fillers sur le module complexe d'un liant testé sur toute l'étendue de températures et de fréquences (Malo, 2013). C'est le rapport entre le module complexe du matériau qu'on souhaite évaluer

et celui d'un matériau de référence. Il est déterminé à une fréquence équivalente quand les matériaux vérifient le PETT (partiel ou total).

Le coefficient complexe de renforcement est un nombre sans unité défini par l'équation suivante :

$$C^* = \frac{G_{mat}^*}{G_{mat_{réf}}^*} \quad (4.2)$$

Comme tout nombre complexe, le C^* est caractérisé par sa norme $|C^*|$ et son angle de phase φ_{c^*} . Il peut donc s'écrire sous la forme suivante :

$$C^* = |C^*|e^{i\varphi_{c^*}} \quad (4.3)$$

Avec

$$|C^*| = \frac{|G_{mat}^*|}{|G_{mat_{réf}}^*|} \quad (4.4)$$

Et

$$\varphi_{c^*} = \varphi_{mat} - \varphi_{mat_{réf}} \quad (4.5)$$

Avant de calculer le C^* , il faut connaître a priori les valeurs de $|G^*|$ et de φ du matériau qu'on veut évaluer et du matériau de référence aux mêmes fréquences équivalentes f_e (fréquences imposées par le modèle 2S2P1D).

Dans notre étude, on propose d'évaluer l'écart de rigidité entre le PG 58-28/V/40 et le PG 58-28/C/40 par rapport à celui du bitume de référence PG 58-28.

La Figure 4.27 illustre l'évolution de l'écart de rigidité entre les trois matériaux testés par rapport au bitume de référence PG 58-28. En effet, les normes des coefficients de

renforcement du PG 58-28 sont unitaires sur toute la gamme de fréquences, ce qui indique qu'il n'y a aucun effet. Par ailleurs, les deux mastics (avec verre et avec calcaire) sont nettement plus raides que le bitume pur sur pratiquement toute la plage de températures et de fréquences. Cette constatation est conforme aux résultats de (Van Rompu et Di Benedetto, 2006). Cependant, à très basse fréquence, on remarque que la courbe du mastic avec verre est au-dessous de celle du bitume de référence.

En définitive, l'évolution de la rigidité entre les deux mastics présente 3 domaines spécifiques :

- $f_e < 10^{-4} \text{ Hz}$: pour les basses fréquences et hautes températures, le mastic avec calcaire est légèrement plus raide que le mastic avec verre;
- $10^{-4} \text{ Hz} < f_e < 10^2 \text{ Hz}$: pour les fréquences intermédiaires, le mastic avec calcaire est plus raide que le mastic avec verre;
- $f_e > 10^2 \text{ Hz}$: pour les hautes fréquences et basses températures, le mastic avec calcaire est plus mou que celui avec verre.

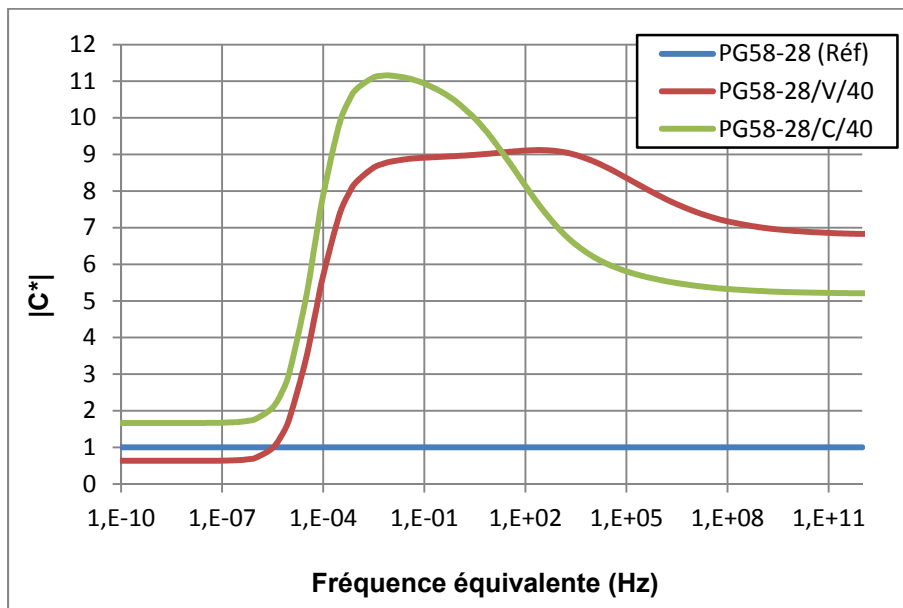


Figure 4.27 Évolution de la norme du coefficient de renforcement complexe en fonction de la fréquence équivalente ($T_R = 10^\circ \text{C}$)

La Figure 4.28 représente l'évolution de l'angle de phase du coefficient complexe de renforcement φ_{c*} sur tout l'intervalle de températures et de fréquences équivalentes. Évidemment, le φ_{c*} relatif au bitume de référence est nul sur toute la plage de fréquences.

À titre informatif, un angle de phase φ_{c*} d'un matériau est négatif si ce dernier présente une composante visqueuse inférieure ou composante élastique supérieure. Par contre si le φ_{c*} est positif, alors le matériau présente une composante visqueuse supérieure (Malo, 2013).

Dans notre cas, pour des basses fréquences et hautes températures, les deux mastics présentent une composante visqueuse supérieure ($\varphi_{c*} > 0$), mais le mastic avec verre tend vers un matériau ayant une composante visqueuse légèrement plus marquée. Pour les hautes fréquences et basses températures, les deux mastics présentent une composante visqueuse moins importante et leur écart demeure négligeable. Ces résultats ont été prouvés également à l'aide des courbes maîtresses présentées précédemment.

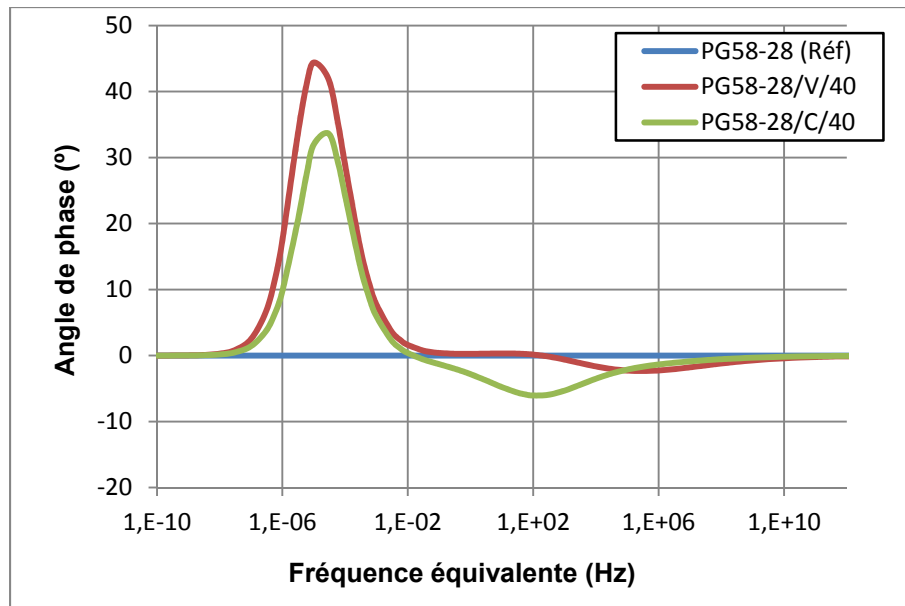


Figure 4.28 Évolution de l'angle de phase du coefficient de renforcement complexe en fonction de la fréquence équivalente ($T_R = 10\text{ °C}$)

4.6 Paramètres de calage du modèle 2S2P1D

Le comportement thermomécanique des matériaux testés lors de ce projet a été représenté par le modèle rhéologique 2S2P1D. En effet, ce modèle permet de décrire l'évolution du module complexe de cisaillement G^* dans le domaine VEL sur toute la gamme de températures et de fréquences. Pour plus de détails, se référer au paragraphe 1.5.3 et l'ANNEXE VII. Le module complexe de cisaillement G^* du modèle 2S2P1D s'exprime par l'équation suivante :

$$G^*(i\omega\tau) = G_{00} + \frac{G_0 - G_{00}}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h} + (i\omega\beta\tau)^{-1}} \quad (4.6)$$

Avec :

- i : nombre complexe tel que $i^2 = -1$;
- G_0 : module instantané ou valeur maximale du module complexe de cisaillement déterminée aux très hautes fréquences ($\omega \rightarrow \infty$) et basses températures (Pa);
- G_{00} : module statique ou valeur minimale du module complexe de cisaillement déterminée aux basses fréquences ($\omega \rightarrow 0$) et hautes températures (Pa);
- ω : pulsation ($\omega = 2\pi f_r$; f_r : fréquence (Hz)) (rad.s^{-1});
- τ : temps de retard dépend de la température d'essai(s);
- δ : constante sans unité;
- h, k : paramètres des éléments paraboliques du modèle 2S2P1D tels que $0 < k < h < 1$;
- β : constante sans unité.

En vue d'effectuer le calage des valeurs expérimentales obtenues à partir de l'essai de cisaillement annulaire, on détermine par itération les sept paramètres du modèle 2S2P1D : $G_0, G_{00}, h, k, \tau, \delta, \beta$ jusqu'à obtention d'un calage convenable dans le plan Cole-Cole et dans l'espace de Black. La Figure 4.29 représente le calage des trois matériaux testés dans le plan Cole-Cole.

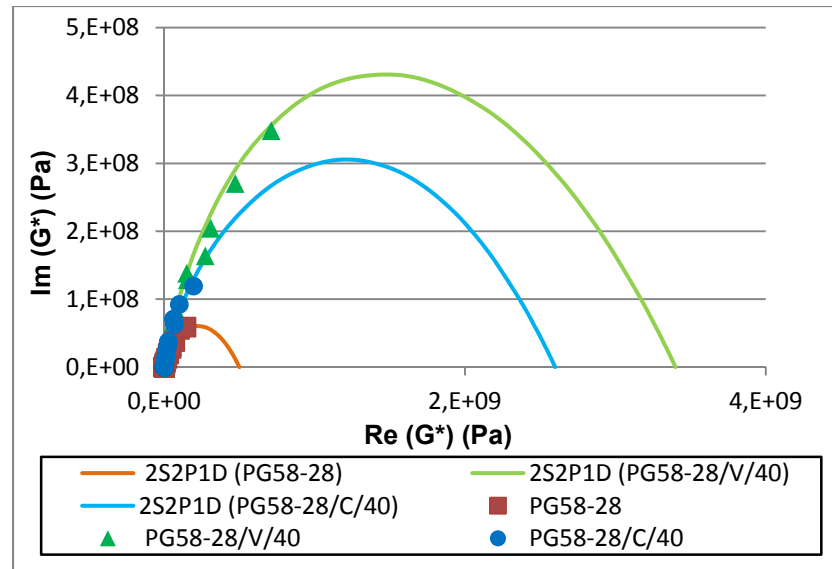


Figure 4.29 Représentation dans le plan Cole-Cole des modules complexes mesurés et modélisés des différents matériaux

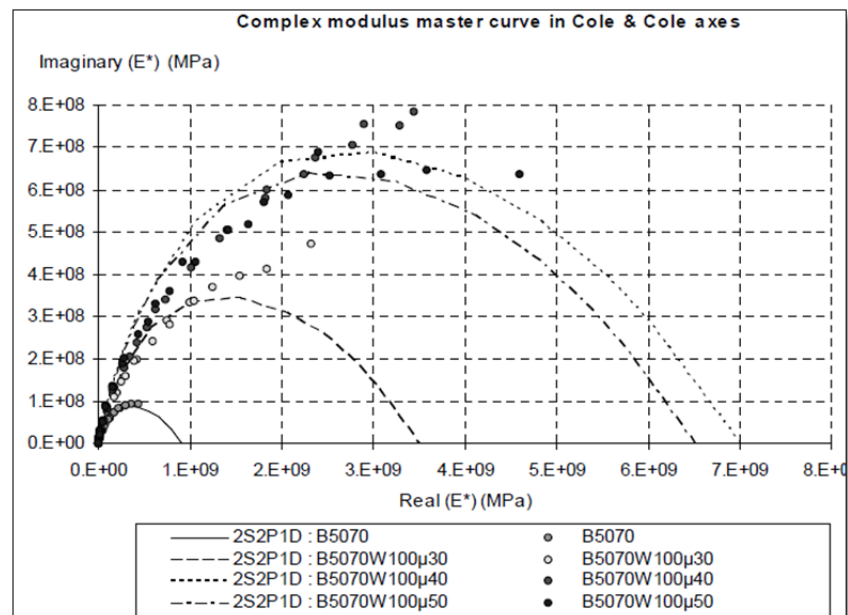


Figure 4.30 Représentation dans l'espace de Cole-Cole des modules complexes mesurés et modélisés des différents matériaux français

Tirée de Van Rompu et Di Benedetto (2006)

En observant la Figure 4.29, on peut dire que le calage dans le plan Cole-Cole des trois matériaux est bon. De plus, les trois courbes ont pratiquement la même allure, ce qui nous permet de déduire les courbes des mastics à partir de la courbe du bitume dont ils sont issus par homothétie comme mentionné à la revue de littérature (*Voir* paragraphes 1.4.6.4 et 4.8). Quelques valeurs expérimentales sont un peu éloignées de la courbe du modèle 2S2P1D du PG 58-28 aux basses températures (-25 °C) et hautes fréquences (valeurs éliminées).

La Figure 4.30 illustre l'évolution des modules complexes dans le plan Cole-Cole des différents matériaux testés en France. On constate que les courbes des mastics et du bitume ont bien la même allure que les nôtres. Pour les basses températures et hautes fréquences, les valeurs expérimentales sont assez éloignées du modèle. Ceci permet d'affirmer que l'essai est incapable d'effectuer des mesures adéquates dans cette gamme de températures à cause de l'endommagement des éprouvettes.

Après avoir calé les valeurs du module complexe obtenues à partir du RCA, on aboutit aux paramètres du modèle 2S2P1D qui sont résumés au Tableau 4.2.

Tableau 4.2 Calage du modèle 2S2P1D pour les trois matériaux testés

$T_R = 10\text{ °C}$	G_{00} (Pa)	G_0 (MPa)	k	h	δ	τ_0 (s)	β	C_1	C_2
PG 58-28	3000	500	0,28	0,65	3,3	0,00002	1500	20,0	218,57
PG 58-28/V/40	1900	3400	0,28	0,65	2,6	0,00003	1500	20,0	218,57
PG 58-28/C/40	5000	2600	0,28	0,65	4	0,000018	1500	20,0	218,57

Tableau 4.3 Calage du modèle 2S2P1D : valeurs des paramètres pour chaque matériau, $T_R=10^\circ\text{C}$ (France)
Adapté de Van Rompu (2006)

$T_R = 10^\circ\text{C}$	G_{00} (Pa)	G_0 (MPa)	k	h	δ	τ (s)	β
B5070	0	900	0,21	0,5	2,3	0,00008	400
B5070W100μ30	100	4000	0,21	0,5	2,3	0,00004	500
B5070100μ40	200	7000	0,21	0,5	2,3	0,00002	500
B5070100μ50	300	6500	0,21	0,5	2,3	0,00006	500

On remarque que les valeurs k, h et β sont invariables pour les trois matériaux testés (*Voir* Tableau 4.2). Ce résultat est très important car on peut déduire les paramètres relatifs aux mastics à partir de ceux du bitume, ceci permet de réduire le nombre de paramètres indépendants du calage.

La valeur minimale de la norme du module complexe G_{00} du bitume doit normalement être inférieure à celle des mastics, mais ce résultat obtenu est tout à fait logique car, en testant le bitume à l'aide du RCA, on s'est arrêté à 35°C à cause du problème de fluage du bitume sous l'effet de son poids propre (le problème de fluage a été réglé par la suite, se référer *au* paragraphe 2.3.4), tandis que les deux mastics ont été testés de -15 à 45°C .

La valeur minimale de la norme du module complexe G_{00} du PG 58-28/V/40 est inférieure à celle du PG 58-28/C/40, ceci permet de conclure que le mastic avec calcaire se comporte mieux que celui avec verre à haute température et offre une meilleure résistance vis à vis de l'orniérage.

La valeur maximale de la norme du module complexe G_0 du PG 58-28/V/40 est supérieure à celle du PG 58-28/C/40, ce qui nous amène à conclure que le mastic avec verre est plus raide que le mastic avec calcaire à basse température et/ou haute fréquence.

Le Tableau 4.3 donne les paramètres de calage pour les matériaux testés en France. On constate que le temps de relaxation du bitume B50/70 est de 0,00008 s tandis que celui du bitume PG 58-28 est de 0,000018 s. Ce résultat est tout à fait normal car notre bitume est plus mou que le bitume standard utilisé en France et donc, il met moins de temps pour retourner à un état stable.

La Figure 4.31 illustre les coefficients de translation a_T en fonction des températures d'essais pour les trois matériaux testés. On remarque que l'évolution du facteur a_T en fonction de la température du mastic PG 58-28/C/40 et du mastic PG 58-28/V/40 est proche à celle du bitume PG 58-28. Par ailleurs, en observant la Figure 4.32, on constate que tous les matériaux fabriqués avec le même liant ont des coefficients de translation très proches. Di Benedetto et Van Rompu (2006) affirment que la thermo-susceptibilité des coefficients de translation a_T d'un mastic est définie par celle du liant qui le constitue. Ce résultat est validé également pour les enrobés bitumineux. Il semble que c'est une propriété du liant.

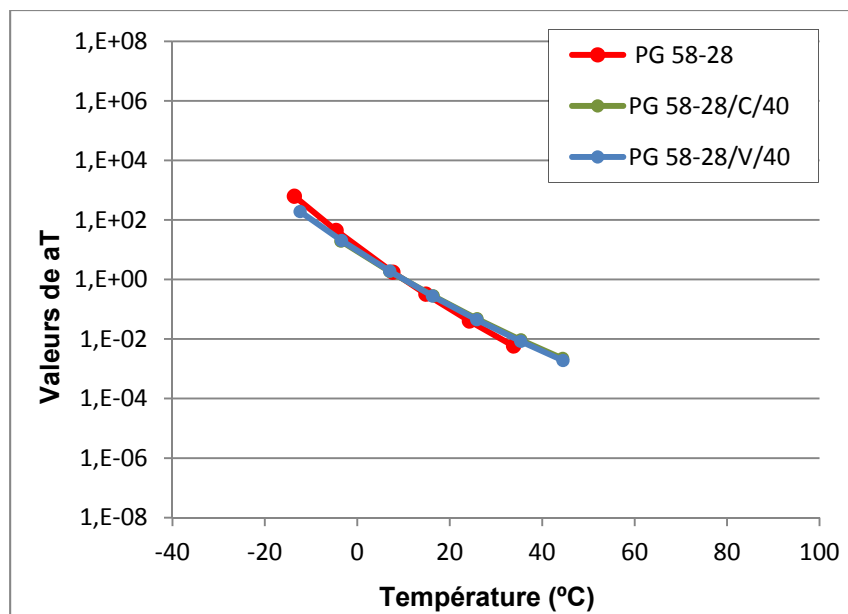


Figure 4.31 Coefficients de translation a_T des trois matériaux testés en fonction de la température ($T_R = 10^{\circ}C$)

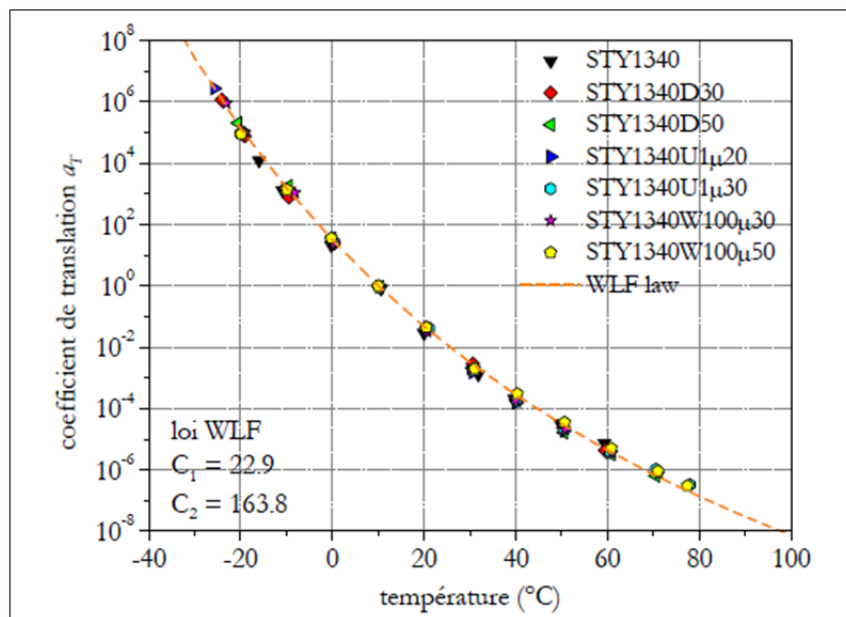


Figure 4.32 Coefficients de translation des matériaux fabriqués en France à base du liant styrel 13/40
Tirée de Van Rompu et Di Benedetto (2006)

4.7 Vérification de l'endommagement des éprouvettes

À la lumière de la méthode présentée au paragraphe 2.5.3, nous étudions l'endommagement des éprouvettes testées lors de la campagne expérimentale. En effet, on calcule le dommage apparent engendré par la Séquence de Cyclage de Sollicitation D_{scs} en fonction de chaque température de mesure lors de l'essai de cisaillement annulaire. Il suffit de comparer les valeurs de $|G^*|$ mesurées à une fréquence au début (0,1 et 1 Hz) avec celles mesurées à la fin de l'essai (1 et 0,1 Hz retour). À noter qu'une éprouvette est considérée comme endommagée si l'écart de rigidité avant et après l'essai dépasse 3%. On rappelle que si un endommagement négatif est observé ($D_{scs} < 0$), on considère que le matériau testé a conservé sa rigidité plutôt qu'il a connu un gain de rigidité (Lamothe, 2014).

4.7.1 Le bitume PG 58-28

La Figure 4.33 montre que l'éprouvette de bitume PG 58-28 semble largement endommagée aux températures 35 et -25 °C. En effet, à 35 °C, le liant a coulé à la fin de l'essai sous l'effet de son poids propre, ce qui a provoqué l'endommagement de l'éprouvette. Par contre à -25 °C, l'essai est incapable d'effectuer des sollicitations en cisaillement. Pour les autres températures d'essai, le D_{scs} se trouve sous la limite d'endommagement imposée. À noter que les mesures de module complexe de cisaillement à -25 °C n'ont pas été prises en compte lors de l'analyse des résultats.

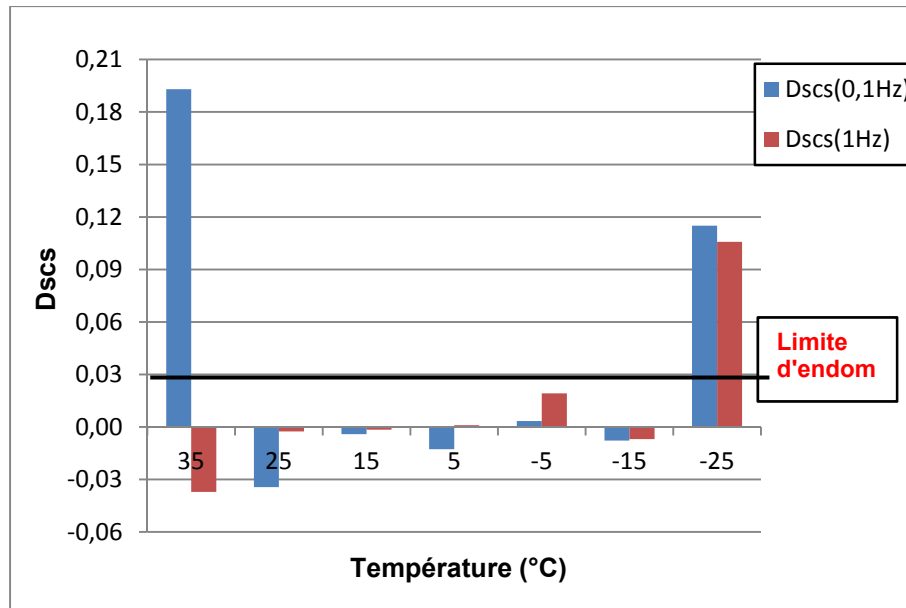


Figure 4.33 Évolution du dommage potentiellement généré par la séquence de cyclage de sollicitation (Dscs) par palier de température (bitume PG 58-28)

4.7.2 Le mastic PG 58-28/V/40

La Figure 4.34 montre que le D_{scs} se trouve sous la limite d'endommagement imposée à pratiquement toutes les températures d'essai. En revanche, l'échantillon a été endommagé à -5 °C. On aurait dû peut être augmenté le temps de rampe entre 5 et -5 °C pour que le matériau ait suffisamment de temps pour retourner à un état stable. À -15 °C, on observe que le D_{scs} dépasse légèrement la limite d'endommagement imposée. Cela est peut-être dû au taux de distorsion imposé à (0,1Hz, -15 °C).

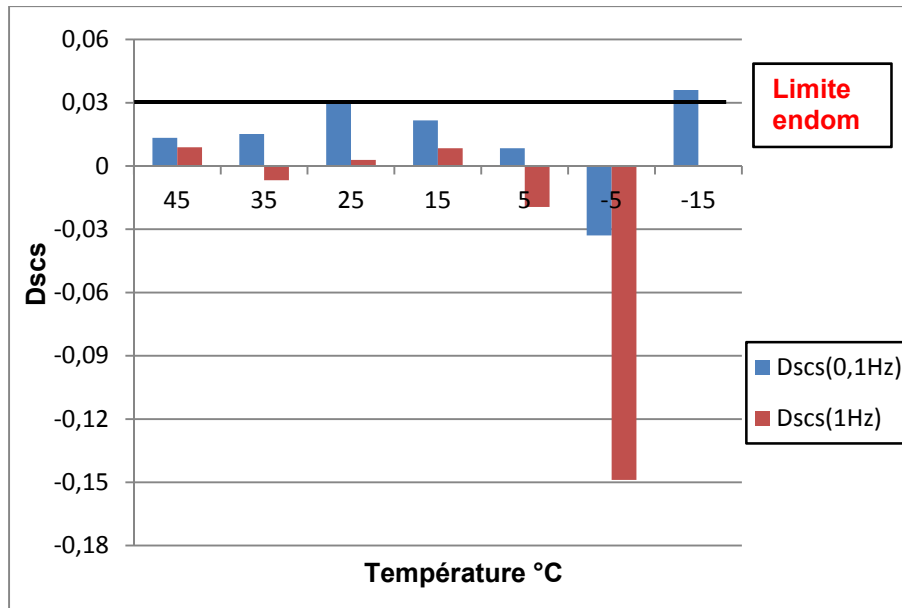


Figure 4.34 Évolution du dommage potentiellement généré par la séquence de cyclage de sollicitation (D_{scs}) par palier de température (mastic PG 58-28/V/40)

4.7.3 Le mastic PG 58-28/C/40

La Figure 4.35 montre que le D_{scs} se trouve sous la limite d'endommagement imposée à la plupart des températures d'essai. Cependant le matériau a été largement endommagé à -5 °C. C'est pour cette raison que le RCA s'est arrêté à la fin des mesures de module complexe à cette température. On aurait dû peut être augmenté le temps de rampe entre 5 et -5°C. De plus notre essai n'est pas performant aux basses températures. On constate que le D_{scs} dépasse largement la limite imposée à (45 °C, 0,1 Hz). Cela est dû probablement au taux de distorsion inadéquat.

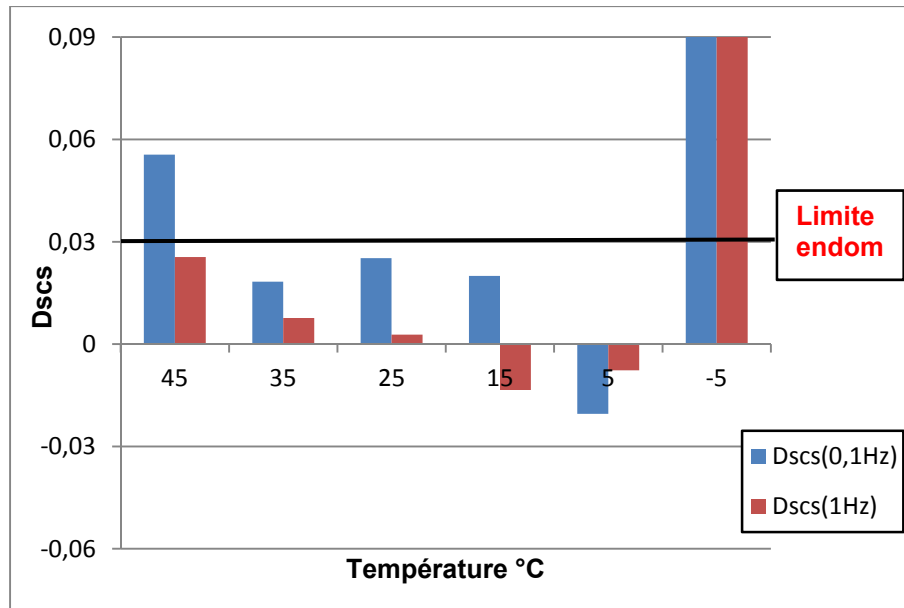


Figure 4.35 Évolution du dommage potentiellement généré par la séquence de cyclage de sollicitation (D_{scs}) par palier de température (mastic PG 58-28/C/40)

4.8 Application de la transformation géométrique de Di Benedetto et coll

La transformation de Di Benedetto SHStS (Shift, Homothety, Shift& time-Shift) présentée au paragraphe 1.3.6.4 consiste à déterminer un modèle de prédiction du module complexe d'un enrobé à partir du module complexe du liant dont il est composé. Dans cette partie, on applique la même méthode afin de prédire le module complexe de cisaillement des mastics testés (PG 58-28/V/40 et PG 58-28/C/40) à partir de celui du bitume dont ils sont issus (PG 58-28).

Le module complexe de cisaillement prédit du mastic s'exprime par la relation suivante (*Voir* paragraphe 1.3.6.4) :

$$G_{mastic}^{*SHStS}(\omega, T) = G_{00_{mastic}} + (G_{liant}^*(10^\alpha \omega, T) - G_{00_{liant}}) \left(\frac{G_{0_{mastic}} - G_{00_{mastic}}}{G_{0_{liant}} - G_{00_{liant}}} \right) \quad (4.7)$$

Le module complexe de cisaillement du liant étant connu à une température T et une pulsation ω , il suffit donc de connaître les valeurs de $G_{0_{mastic}}$, $G_{00_{mastic}}$ et α afin de déterminer la valeur du module complexe de cisaillement du mastic prédit au même couple température-fréquence. $G_{00_{mastic}}$ représente la valeur de la norme du module complexe de cisaillement quand la fréquence tend vers 0, $G_{0_{mastic}}$ définit le module infini, c'est-à-dire lorsque la fréquence tend vers l'infini et α est un paramètre qui dépend de la formulation du mastic et/ou du vieillissement du matériau pendant la fabrication. Ce paramètre lie le temps de relaxation du mastic à celui du liant à l'aide de la relation suivante :

$$\tau_{mastic} = 10^\alpha \tau_{liant} \quad (4.8)$$

En se basant sur le module complexe de cisaillement du liant $G_{liant}^*(T, \omega)$, à la température T et la pulsation ω , on obtient le module complexe de cisaillement du mastic prédit $G_{mastic}^{*SHStS}(10^{-\alpha} \omega, T)$ à la température T et la pulsation $10^{-\alpha} \omega$ par trois transformations géométriques consécutives dans le plan de Cole-Cole qui sont (*Voir* Figure 4.36) :

- une translation négative de valeur $G_{00_{liant}}$ suivant l'axe des réels. Cette valeur est quasi-nulle pour la plupart des liants bitumineux;
- une homothétie de rapport $\frac{G_{0_{mastic}} - G_{00_{mastic}}}{G_{0_{liant}} - G_{00_{liant}}}$ à partir de l'origine;
- une translation positive de valeur $G_{00_{mastic}}$ suivant l'axe des réels.

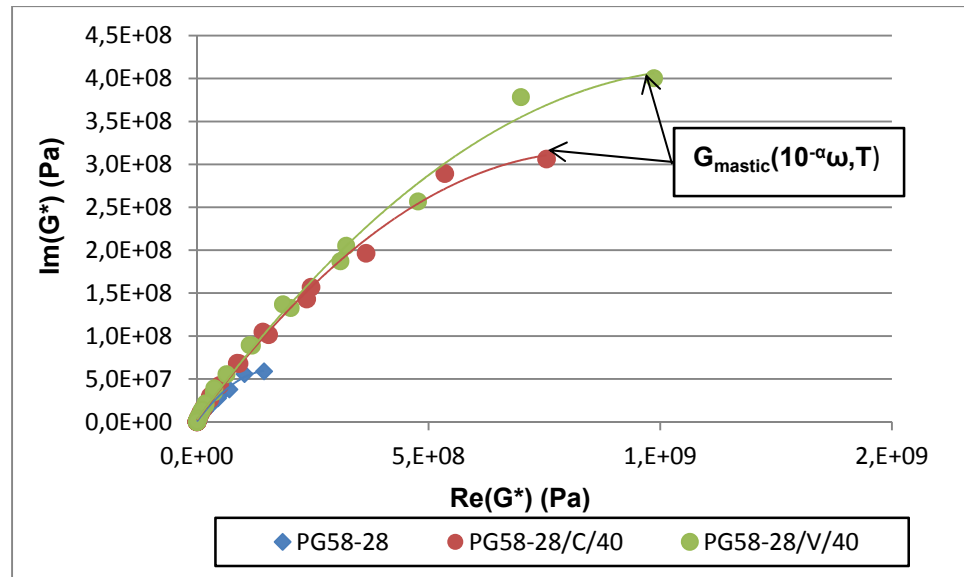


Figure 4.36 Transformation SHStS des mastics PG 58-28/V/40 et PG 58-28/C/40 à partir du bitume PG 58-28

La transformation de Di Benedetto SHStS a été appliquée pour les mastics PG 58-28/V/40 et PG 58-28/C/40 (*Voir* Figure 4.36). On constate que les prédictions à partir du bitume PG 58-28 permettent de simuler correctement les données expérimentales des mastics obtenues grâce au RCA (*Voir* Figures 4.37 et 4.38).

Cette méthode a été développée spécialement pour prédire le comportement de l'enrobé à partir du liant dont il est constitué. Il semble que c'est un bon outil pour la prédiction du module complexe de cisaillement des mastics bitumineux à partir du bitume dont ils sont issus quel que soit le type du bitume, la nature et la proportion des fillers utilisés.

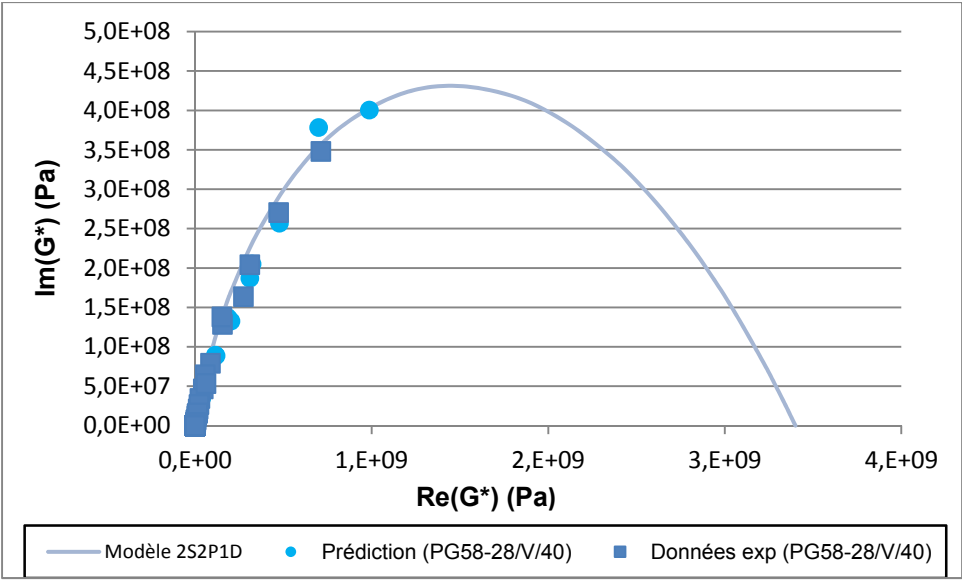


Figure 4.37 Données expérimentales et prédites du mastic PG 58-28/V/40

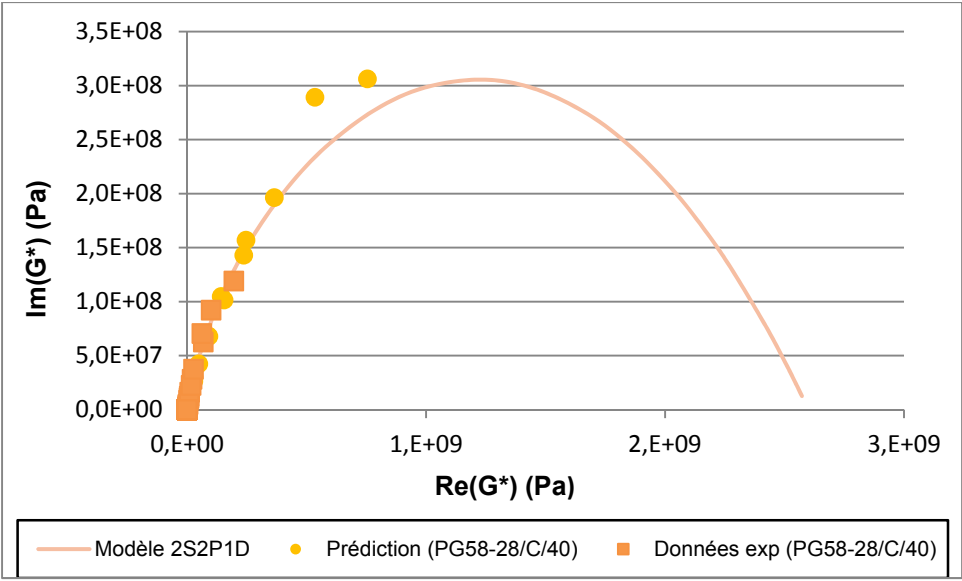


Figure 4.38 Données expérimentales et prédites du mastic PG 58-28/C/40

CONCLUSION

Dans le domaine des petites déformations (VEL), le comportement thermomécanique des mastics bitumineux avec filler de verre incorporé (PG 58-28/V/40) et avec filler de calcaire incorporé (PG 58-28/C/40) et du bitume PG 58-28 a été caractérisé au sein du LCMB.

Le Rhéomètre à Cisaillement Annulaire de grandes dimensions (RCA), développé au Laboratoire de l'ENTPE en France, a été introduit pour la première fois lors de cette étude pour déterminer les propriétés rhéologiques de ces matériaux, testés sur une large gamme de températures et de fréquences (de -15 à 45 °C et de 0,03 à 10 Hz).

Avec le bitume et les fillers utilisés et dans les proportions de fillers choisies, l'analyse des résultats fournis par le RCA montre que :

- un mastic bitumineux peut être considéré comme étant un matériau quasi-homogène. Ceci permet d'adapter les essais conventionnels sur les bitumes aux mastics;
- un mastic est nettement plus raide que le bitume dont il est issu sur toute l'étendue de températures et de fréquences;
- pour les basses fréquences et/ou hautes températures, le mastic avec calcaire est plus rigide que le mastic avec verre. En effet, le squelette granulaire de calcaire qui reprend la majorité des forces semble plus rigide que celui de verre. Par ailleurs, les deux mastics présentent une composante visqueuse importante, mais le mastic avec verre tend vers un matériau ayant une composante visqueuse relativement plus marquée;
- pour des températures intermédiaires, les deux mastics ont des comportements quasi-semblables;

- pour les hautes fréquences et/ou basses températures, le mastic avec verre est plus rigide que le mastic avec calcaire. De plus, les deux mastics présentent une composante visqueuse moins importante et leur écart reste négligeable;
- le principe de superposition temps-température (PETT) a été validé pour les trois matériaux dans le domaine de Black mais demeure incertain en ce qui à trait au domaine Cole-Cole. De plus, les coefficients de translation a_T des mastics sont à tous points semblables à ceux du liant. Il semble être des propriétés du liant et sont indépendants de la structure granulaire;
- le modèle rhéologique 2S2P1D permet de bien simuler le comportement des matériaux sur toute la plage de températures et de fréquences. Par ailleurs, la calibration des résultats expérimentaux sur le modèle 2S2P1D montre que trois paramètres ne varient pas pour tous les matériaux. Ces coefficients semblent être des propriétés du liant, ce qui permet de réduire les paramètres indépendants du calage;
- la prédiction du module complexe de cisaillement des mastics bitumineux à partir de celui du bitume a été validée par la transformation géométrique de Di Benedetto SHStS;
- l'endommagement des éprouvettes en cours d'essais a été vérifié en illustrant l'évolution du dommage généré par la séquence de cyclage de sollicitation en fonction de chaque température de mesure.

Il est important de souligner que ces résultats sont conformes à ceux de Van Rompu et Di Benedetto (2006) et peuvent différer en fonction de plusieurs paramètres, à savoir : le type de bitume et des fillers, la taille et les proportions des fillers incorporées. Les recherches se poursuivent au LCMB afin de tracer un portrait plus précis du comportement des mastics avec filler de verre post-consommation.

RECOMMANDATIONS

Les recherches effectuées au sein du LCMB lors de ce projet permettent d'étudier la rhéologie du liant et des mastics bitumineux testés et comprendre le fonctionnement du RCA, mais les résultats obtenus restent préliminaires et ne nous permettent pas d'avoir une idée globale sur l'incorporation des fillers de verre post-consommation. Pour compléter ces travaux, d'autres essais doivent être réalisés pour qu'on puisse identifier les paramètres qui influencent le comportement thermomécanique des mastics avec fillers de verre en variant la taille et la concentration volumique en fillers. De plus, il est souhaitable d'identifier la proportion de fillers de verre optimale correspondant à un meilleur comportement rhéologique. Une étude sur différents liants peut être envisageable.

Le dispositif expérimental utilisé pour déterminer les propriétés mécaniques des liants et mastics doit être amélioré en insérant une sonde à la partie externe du moule de coulage, ceci permet un contact direct entre la sonde et le matériau en place pour mieux contrôler la température de l'échantillon. Par ailleurs, les prochains chercheurs peuvent développer le RCA en introduisant un système d'accouplement des deux cellules de charges (de capacités 5 et 100 kN) afin d'éviter d'arrêter l'essai lors du passage des hautes aux basses températures.

ANNEXE I

PROCÉDURE DE PRÉPARATION D'UNE ÉPROUVETTE ANNULAIRE DE BITUME OU DE MASTIC

1. Objet

Cette procédure consiste à couler un échantillon de bitume ou de mastic bitumineux dans un rhéomètre à cisaillement annulaire afin de préparer une éprouvette d'essai de forme annulaire à section réduite permettant de caractériser le comportement d'un bitume ou mastic bitumineux en appliquant dans la partie centrale de l'éprouvette une sollicitation cyclique sinusoïdale en contrôle de déplacement.

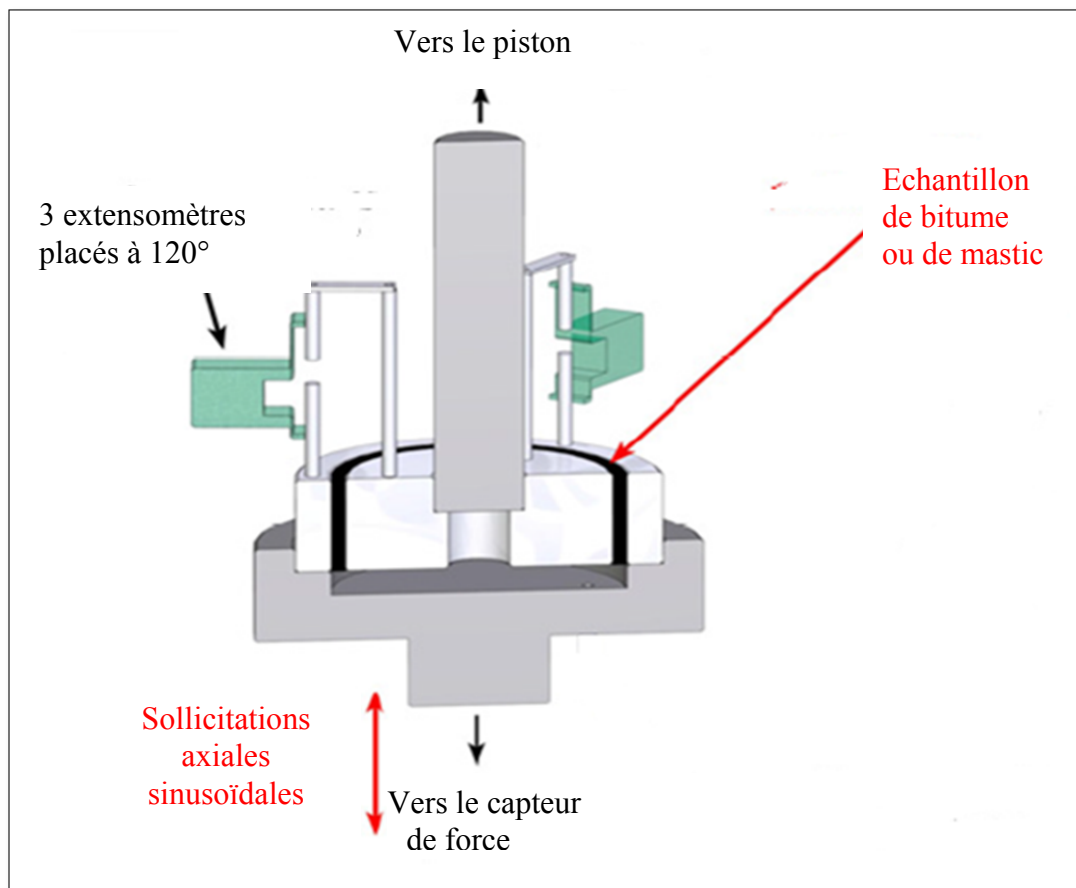


Figure-A I -1 Schéma de la cellule de cisaillement annulaire

2. Références

Aucune référence n'est requise pour cette procédure.

3. Principe de la méthode de préparation de l'éprouvette

L'essai de cisaillement annulaire permet d'appliquer un cisaillement sur un cylindre creux de bitume ou de mastic bitumineux à différents couples température-fréquence dans le domaine viscoélastique linéaire. En effet, le module complexe de cisaillement G^* est calculé à partir de la contrainte de cisaillement et de la distorsion. Les dimensions du cylindre creux sont données à la Figure A I-2.

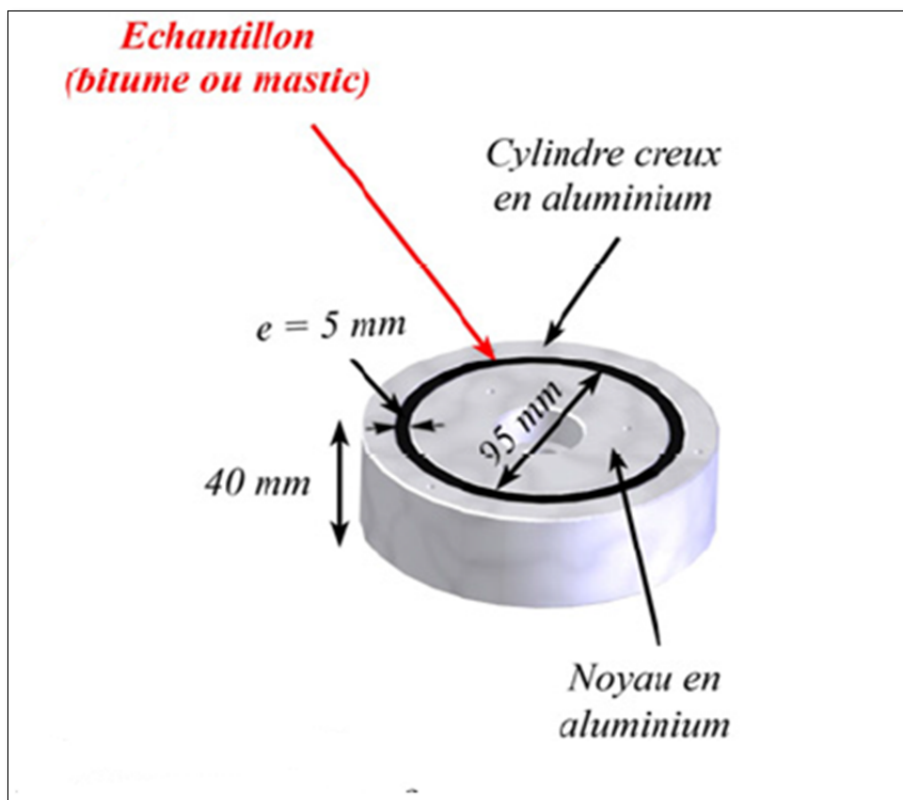


Figure-A I-3 Dimensions du moule de coulage

4. Appareillage

Les outils utilisés sont :

- cellule de cisaillement annulaire,
- bécher avec bec verseur de 50 ml,
- spatule triangle de 40 mm de largeur,
- torche à propane,
- tige de malaxage en verre,
- bécher de 500 ml,
- plaque chauffante électrique capable de maintenir des températures de 180 °C,
- étuve capable de maintenir des températures de 180 °C,
- balance précise au 100 ième de gramme,
- disque en papier de 150 mm de diamètre résistant à 180 °C (le disque en papier pour PCG peut être utilisé),
- clé à molette,
- clé « Allen key »,
- gants étanches de laboratoire.

5. Calcul des constituants

Pour préparer une éprouvette, il faut un total de 25 ml de bitume ou de mastic. En tenant compte de la viscosité du bitume qui colle aux parois des récipients, on prévoit un mélange de 125 ml pour compenser les pertes.

Dans le cas des mastics, il est important de calculer avec précision la quantité de fillers à utiliser compte tenu de la concentration volumique C_f des fillers que l'on souhaite avoir. Pour ce faire :

- considérer une masse initiale de bitume (m_b) de 100g;
- calculer la masse de fillers (m_f) suivant le pourcentage C_f ciblé dans le mastic à l'aide de l'équation suivante.

$$m_f = \left(\frac{d_f}{d_b} \right) \left(\frac{C_f}{1 - C_f} \right) m_b \quad (\text{A I-1})$$

Avec :

- m_b : masse du bitume
- m_f : masse des fillers
- d_b : densité du bitume
- d_f : densité des fillers

- C_f : fraction volumique des fillers

Exemple:

Dans le cas d'un mastic constitué du bitume PG58-28 de densité $d_b = 1,020$ et des fillers de verre A de densité $d_f = 2,532$ à concentration volumique de 15%, la masse de fillers requise est :

$$m_f = \left(\frac{2,532}{1,020} \right) \times \left(\frac{0,15}{1-0,15} \right) \times 100 = 43,81 \text{ g} \quad (\text{A I-2})$$

6. Étapes de préparation de l'échantillon à tester

- chauffer le bitume, les fillers, les béchers et la tige de verre à 150 °C (160 °C dans le cas des mastics) pendant 3 heures pour que le bitume soit facilement manipulable et pour éviter les chocs thermiques car le matériel utilisé sera par la suite en contact avec les matériaux à tester;
- placer le bécher de 500 ml sur la balance et tarer ;
- verser 100 g de bitume chauffé préalablement à 150 °C dans le bécher de 500 ml et tarer;
- incorporer dans le bitume, par petites quantités, la masse de fillers (m_f) calculée;
- malaxer manuellement, pendant 3 min, le bitume et les fillers à l'aide d'une tige en verre sur une plaque chauffante électrique maintenant une température de 150 °C.

Après homogénéisation du mélange, la gâchée est placée dans un congélateur à -10 °C afin de conserver ses propriétés rhéologiques. (-10 °C est la température idéale pour garantir de bonnes conditions de conservation). Il est très souhaitable de limiter l'impact des cycles de chauffage sur le matériau : ne pas dépasser deux passages à l'étuve pour éviter l'oxydation du liant.

7. Mode opératoire

Pour que l'échantillon soit facilement manipulable, on le place 3 heures à l'étuve à 150 °C (pour un bitume) et à 160 °C (pour un mastic hautement concentré). On veille à ce que la température ne soit pas trop élevée pour ne pas altérer les propriétés des matériaux.

Le moule où on coule l'échantillon est constitué des cylindres interne et externe solidarisés par une plaque vissée sur les deux cylindres.



Figure-A I-3 constituants de la cellule de cisaillement annulaire

Ensuite :

- placer le disque de papier entre la plaque de la cellule de cisaillement annulaire et le cylindre externe en aluminium et à l'aide des trois boulons externes indiqués à la Figure A I-4 , visser la plaque sur le cylindre externe en aluminium;

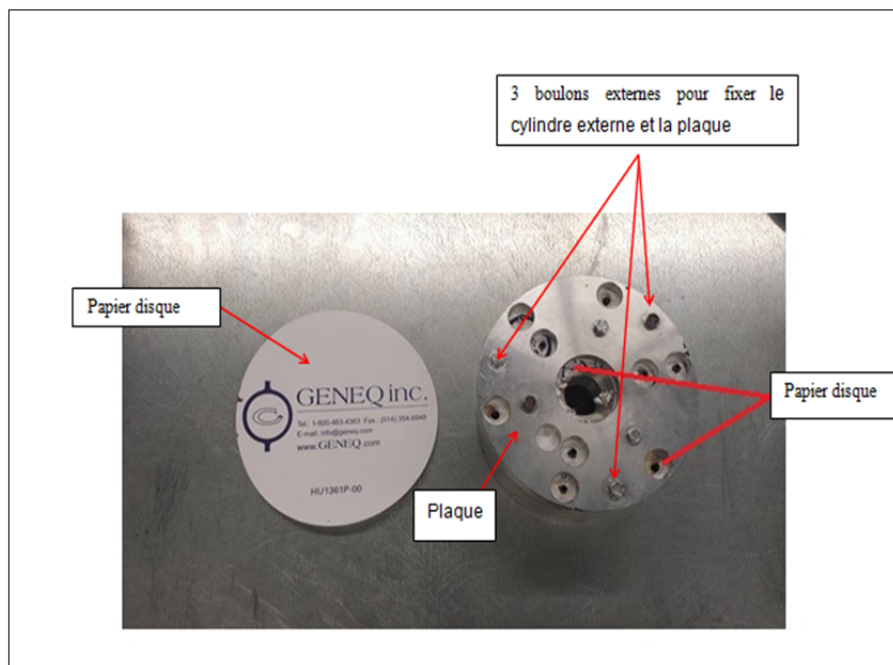


Figure-A I-4 Montage du moule de coulage

- à l'aide des trois boulons internes, fixer le cylindre interne et la plaque;

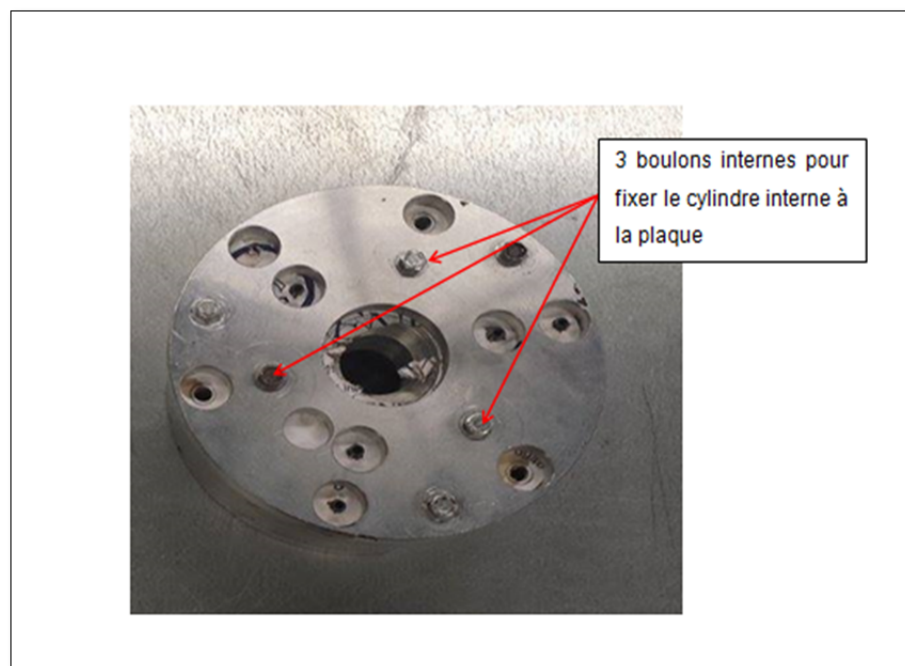


Figure-A I-5 Montage du moule de coulage (face supérieure)

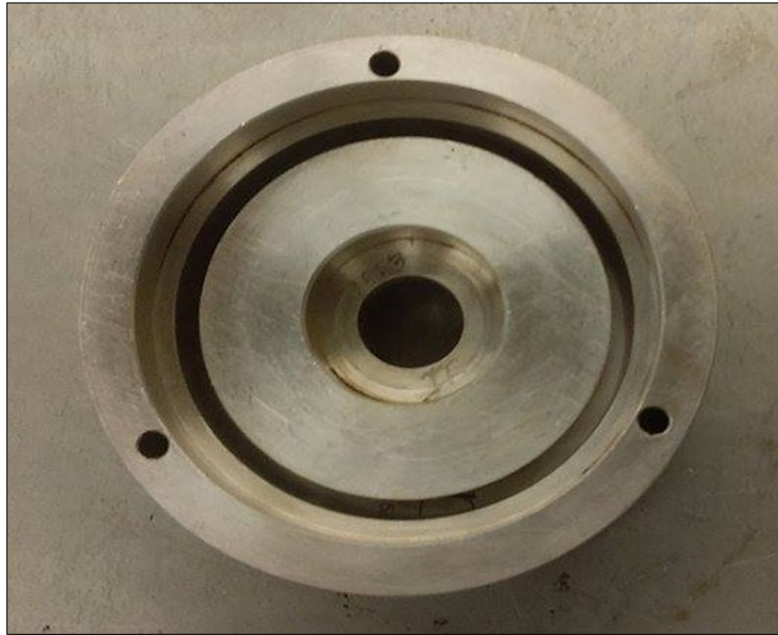


Figure-A I-6 Moule de coulage (face inférieure)

- insérer un bouchon de 45 mm de diamètre au centre du noyau en aluminium pour éviter de couler le bitume ou le mastic dans l'axe central (*Voir Figure A I-7*);

Une fois le moule est fait, on le place avec les matériaux à l'étuve pendant 30 min à 150 °C (pour un bitume) et à 160 °C (pour un mastic hautement concentré). Quelques minutes avant le coulage, le matériau est mélangé manuellement avec la tige en verre afin de l'homogénéiser. Cette opération est très importante lorsqu'un échantillon de mastic est préparé. En effet, les fillers ont tendance à s'agglomérer au fond du récipient contenant le mastic sous l'action de leur poids.

Ensuite :

- couler l'échantillon chauffé préalablement dans l'entrefer entre le cylindre interne et le cylindre externe avec le petit bec verseur de 50 ml, cette opération est réalisée par passes successives le long de la paroi du cylindre interne;
- s'assurer que le moule est entièrement rempli jusqu'à formation d'un bourrelet d'excédent et disparition des bulles d'air;
- laisser reposer le corps d'épreuve 6 h à température ambiante pour qu'il devienne visqueux à solide;

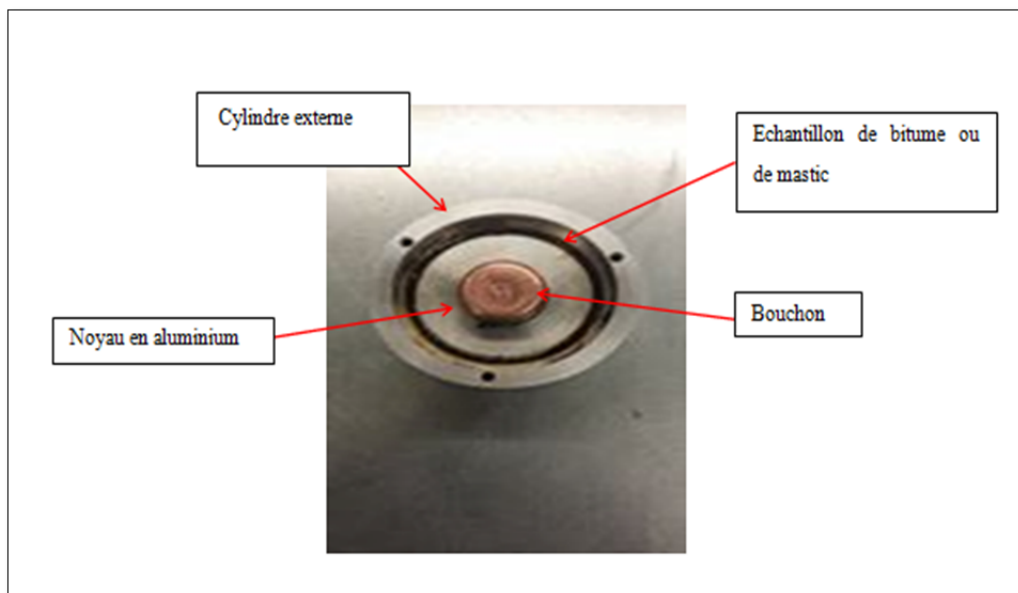


Figure-A I-7 Coulage de l'échantillon de bitume ou de mastic

- chauffer la spatule à l'aide de la torche (3 à 5 secondes), araser le matériau excédant et nettoyer la surface à l'aide d'un solvant (agent chimique) et un papier absorbant. Il convient d'être attentif en utilisant le solvant car il s'agit d'un produit toxique et inflammable;

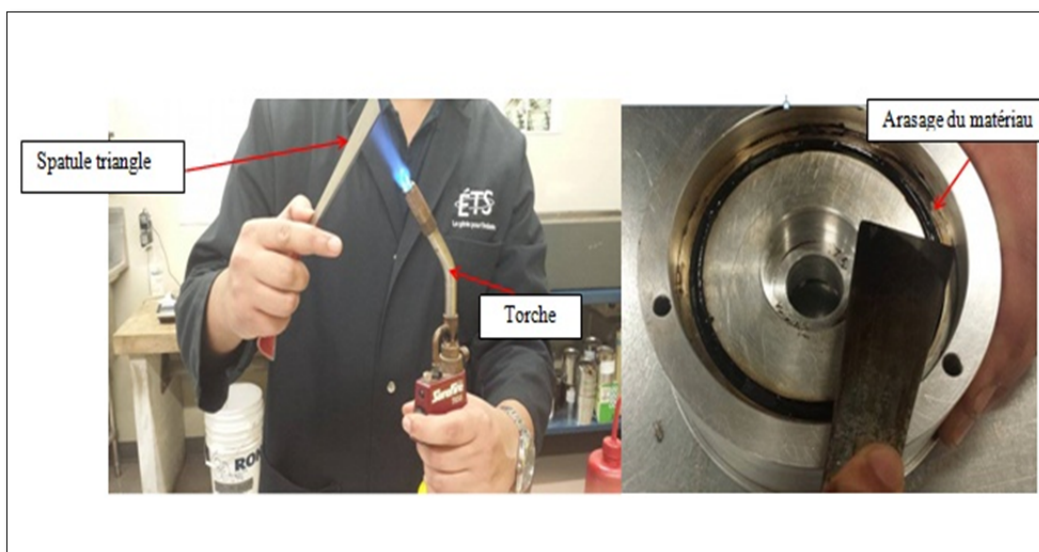


Figure-A I-8 Arasage du matériau excédent

- fixer l'axe principal de transmission des efforts sur le moule par l'intermédiaire d'un grand boulon comme indiqué ci-dessous;

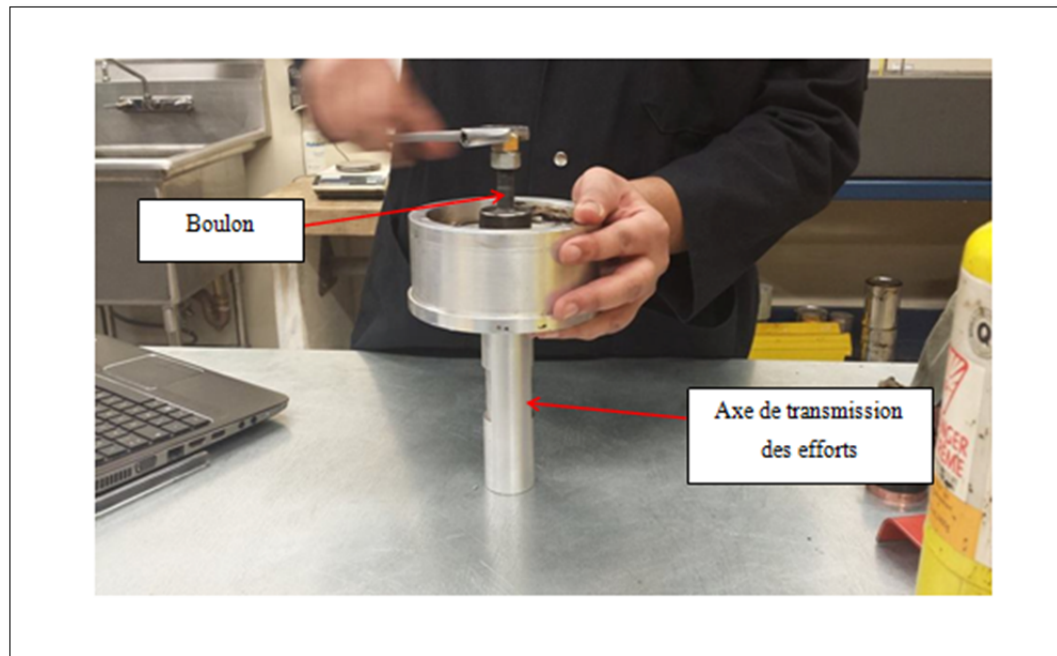


Figure-A I-9 Fixation de l'axe de transmission des efforts sur le moule

- fixer l'embase de la cellule de cisaillement sur le cylindre extérieur en aluminium par les trois vis prévues à cet effet (*Voir Figure A I-10*);

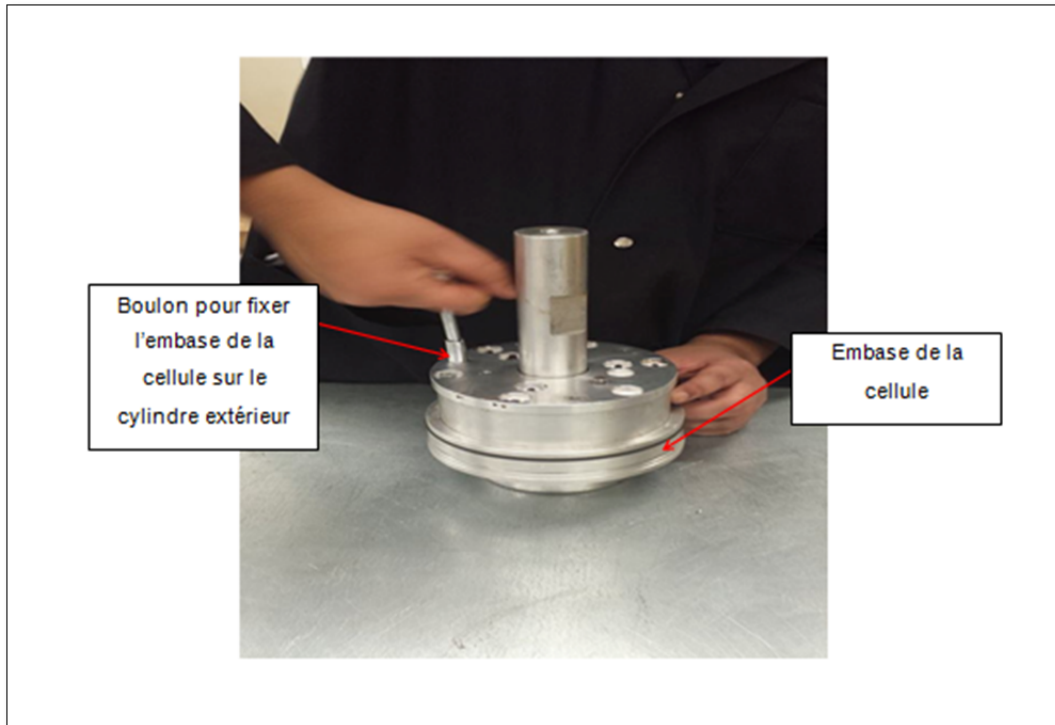


Figure-A I-10 Fixation du moule dur l'embase de la cellule

- visser les 6 tiges de fixation des extensomètres sur le cylindre extérieur dans les taraudages faits à cet effet.

Enfin, une fois l'éprouvette a été confectionnée et équipée, on la place dans un congélateur à -10°C pour éviter le fluage et le vieillissement de l'échantillon à tester.

ANNEXE II

PRÉSENTATION DE LA MÉTHODE DES MOINDRES CARRÉS

Daniel Perraton et Souleimane El mansouri

La méthode des moindres carrés permet de comparer des données expérimentales (système discret), généralement entachées d'imprécisions de mesure, à une fonction d'approximation décrivant un modèle mathématique (système continu) censé de décrire ces données. Elle consiste donc à minimiser l'impact des erreurs expérimentales en ajoutant de l'information dans le processus de mesure.

Dans le cadre de ce projet, l'essai de cisaillement annulaire est réalisé en appliquant des sollicitations sinusoïdales sur une éprouvette de liant bitumineux. La fonction d'approximation en fonction du temps peut s'exprimer alors comme suit :

$$Y(t_i) = a \sin(\omega t_i + \varphi) \quad (\text{A II-1})$$

Avec :

- Y : variable à transposer du système discret au système continu, peut désigner contrainte de cisaillement ou distorsion;
- a : amplitude du signal de contrainte de cisaillement ou de distorsion;
- ω : pulsation;
- φ : angle de phase.

La Figure A II- 1 illustre un exemple de données expérimentales de contrainte de cisaillement approchées par la méthode des moindres carrés.

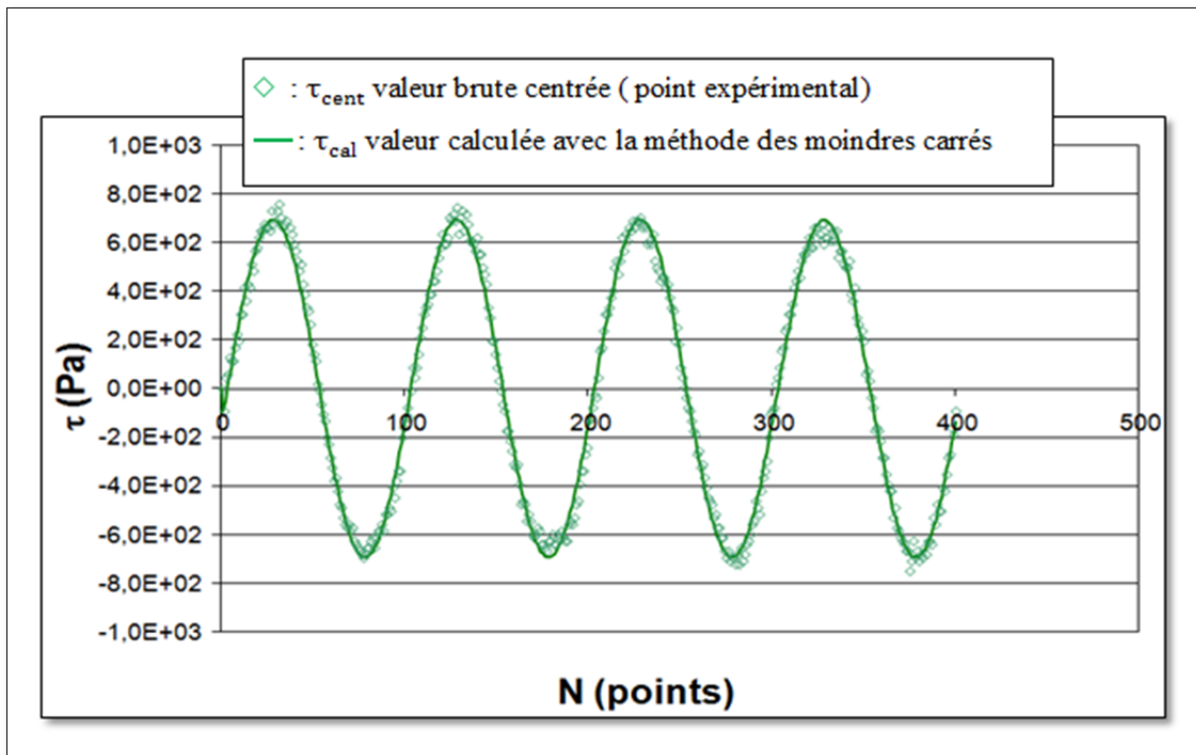


Figure-A II- 1 Signal de contrainte de cisaillement approché par la méthode des moindres carrés essai ASR/PG 58-28/V/ 40 (fr = 0,3 Hz et T = 45°C)

On a pour tout(i , j) $\in \mathbb{R}^2$ **$\sin(i + j) = \sin(i) \cos(j) + \cos(i) \sin(j)$**

Donc : $Y(t_i) = a (\sin(\omega t_i) \cos(\varphi) + \cos(\omega t_i) \sin(\varphi))$

En posant : $A = a \cos(\varphi)$ et $B = a \sin(\varphi)$

On obtient : **$Y(t_i) = A. \sin(\omega t_i) + B. \cos(\omega t_i)$**

Déterminons A et B en utilisant l'expression des moindres carrés :

$$m = \sum_{i=1}^n (Y(t_i) - Y_i)^2$$

Y_i représente la valeur centrée brute

On remplace $Y(t_i)$ par sa valeur, on obtient :

$$m = \sum_1^n (A \cdot \sin(\omega t_i) + B \cdot \cos(\omega t_i) - Y_i)^2$$

Par souci de lourdeur d'écriture, on pose : $\sin(\omega t_i) = \sin$, $\cos(\omega t_i) = \cos$ et $\sum_1^n X = \sum X$

Donc : $m = \sum (A \cdot \sin + B \cdot \cos - Y_i)^2$

Pour minimiser l'écart entre la valeur mesurée et la valeur calculée, la variation de m par rapport à A et B doit être nulle.

$$\begin{aligned} \text{➤ } \frac{\partial m}{\partial A} = 0 & \Leftrightarrow \sum 2 \cdot \sin(A \cdot \sin + B \cdot \cos - Y_i) = 0 \\ & \Leftrightarrow \sum (A \cdot \sin^2 + B \cdot \cos \cdot \sin - Y_i \cdot \sin) = 0 \\ & \Leftrightarrow \mathbf{A \sum \sin^2 + B \sum \cos \cdot \sin - \sum Y_i \cdot \sin = 0 \text{ (1)}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{➤ } \frac{\partial m}{\partial B} = 0 & \Leftrightarrow \sum 2 \cdot \cos(A \cdot \sin + B \cdot \cos - Y_i) = 0 \\ & \Leftrightarrow \sum (A \cdot \sin \cdot \cos + B \cdot \cos^2 - Y_i \cdot \cos) = 0 \\ & \Leftrightarrow \mathbf{A \cdot \sum \sin \cdot \cos + B \cdot \sum \cos^2 - \sum Y_i \cdot \cos = 0 \text{ (2)}} \end{aligned}$$

De(1) on a : $B = \frac{\sum Y_i \cdot \sin - A \cdot \sum \sin^2}{\sum \cos \cdot \sin}$

On remplace B par sa valeur dans **(2)** , on a :

$$\begin{aligned} A \cdot \sum \sin \cdot \cos + \left(\frac{\sum Y_i \cdot \sin - A \cdot \sum \sin^2}{\sum \cos \cdot \sin} \right) \sum \cos^2 - \sum Y_i \cdot \cos &= 0 \\ A \cdot \left(\sum \sin \cdot \cos \right)^2 + \sum \cos^2 \sum Y_i \cdot \sin - A \sum \cos^2 \sum \sin^2 &= \sum \cos \cdot \sin \sum Y_i \cdot \cos \\ A \left(\left(\sum \cos \cdot \sin \right)^2 - \sum \sin^2 \sum \cos^2 \right) &= \sum \sin \cdot \cos \sum Y_i \cdot \cos - \sum \cos^2 \sum Y_i \cdot \sin \end{aligned}$$

$$\boxed{A = \frac{\sum \cos^2 \sum Y_i \cdot \sin - \sum \sin \cdot \cos \sum Y_i \cdot \cos}{\sum \sin^2 \sum \cos^2 - (\sum \cos \cdot \sin)^2}}$$

De (1) on a : $A = \frac{\sum Y_i \cdot \sin - B \cdot \sum \cos \cdot \sin}{\sum \sin^2}$

On remplace A par sa valeur dans **(2)** , on a :

$$\sum \sin \cdot \cos \left(\frac{\sum Y_i \cdot \sin - B \cdot \sum \cos \cdot \sin}{\sum \sin^2} \right) + B \sum \cos^2 - \sum Y_i \cdot \cos = 0$$

$$B \left(\sum \sin^2 \sum \cos^2 - (\sum \cos \cdot \sin)^2 \right) + \sum \sin \cdot \cos \sum Y_i \cdot \sin - \sum \sin^2 \sum Y_i \cdot \cos = 0$$

$$\mathbf{B} = \frac{\sum \sin^2 \sum Y_i \cdot \cos - \sum \sin \cdot \cos \sum Y_i \cdot \sin}{\sum \sin^2 \sum \cos^2 - (\sum \cos \cdot \sin)^2}$$

A et B se calculent facilement avec Excel, ce sont de simples sommations.

ANNEXE III

GRAPHES DE LINÉARITÉ DU MASTIC PG 58-28/C/20

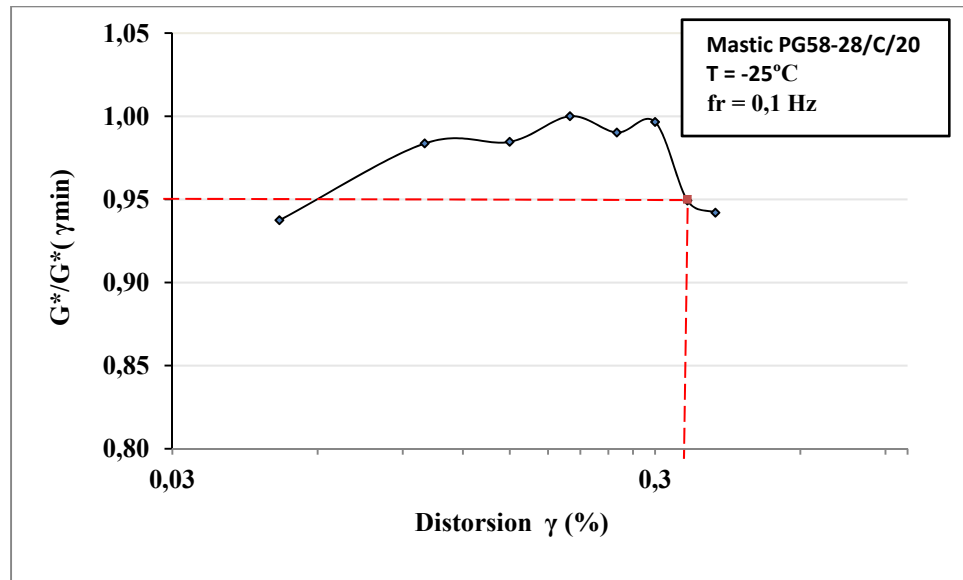


Figure-A III-1 Linéarité mastic PG 58-28/C/20 (T = -25 °C et fr = 0,1 Hz)

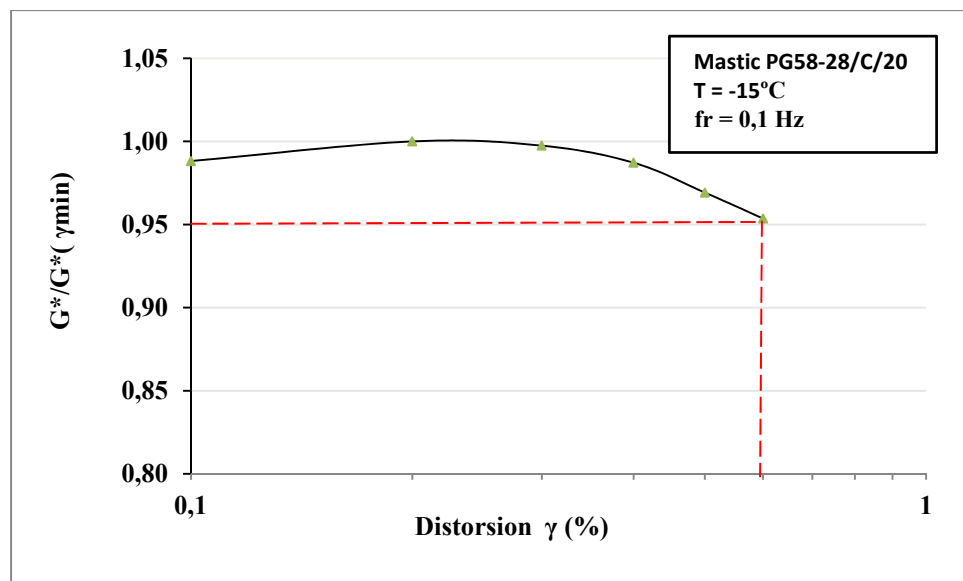


Figure-A III- 2 Linéarité mastic PG 58-28/C/20 (T = -15 °C et fr = 0,1 Hz)

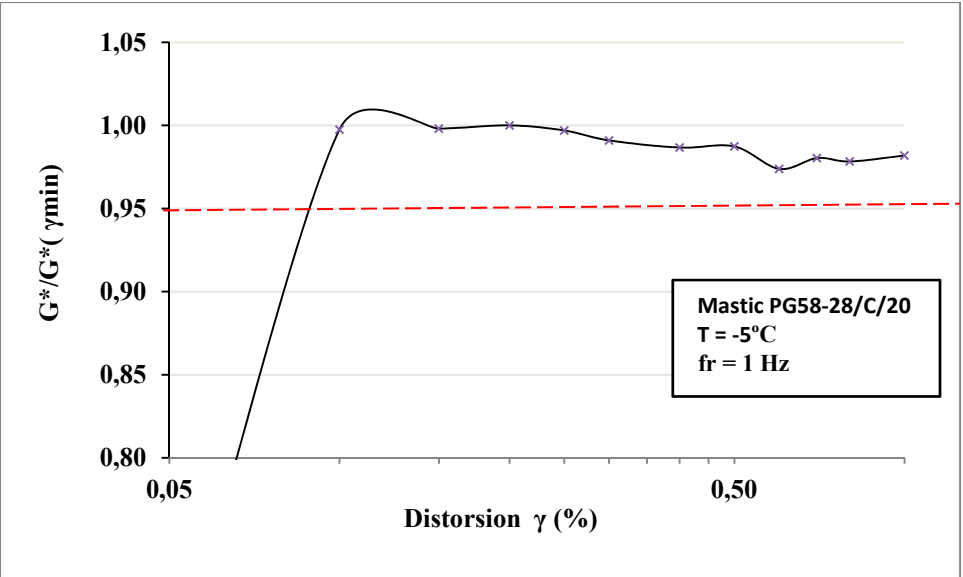


Figure-A III- 3 Linéarité mastic PG 58-28/C/20 (T = -5 °C et fr = 1 Hz)

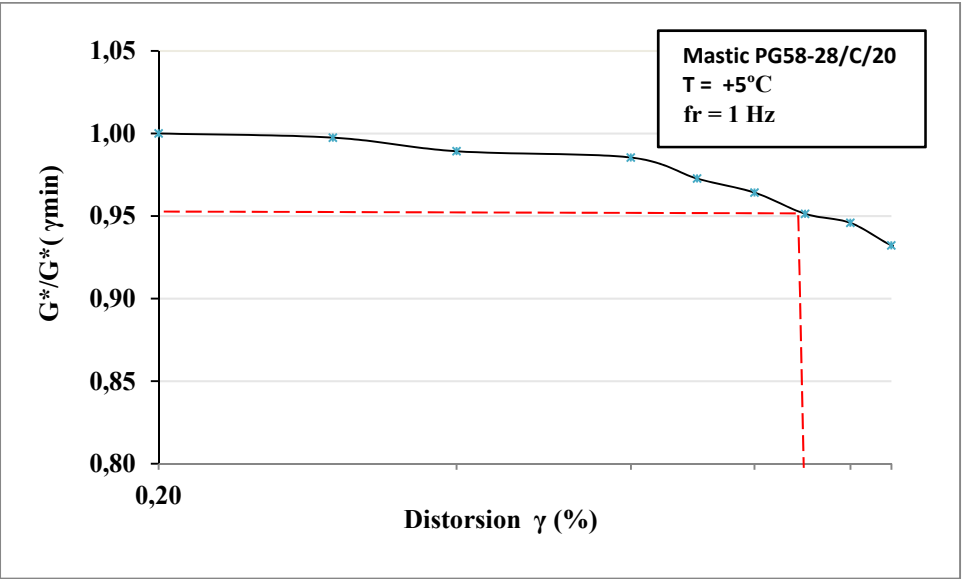


Figure-A III- 4 Linéarité mastic PG 58-28/C/20 (T = +5 °C et fr = 1 Hz)

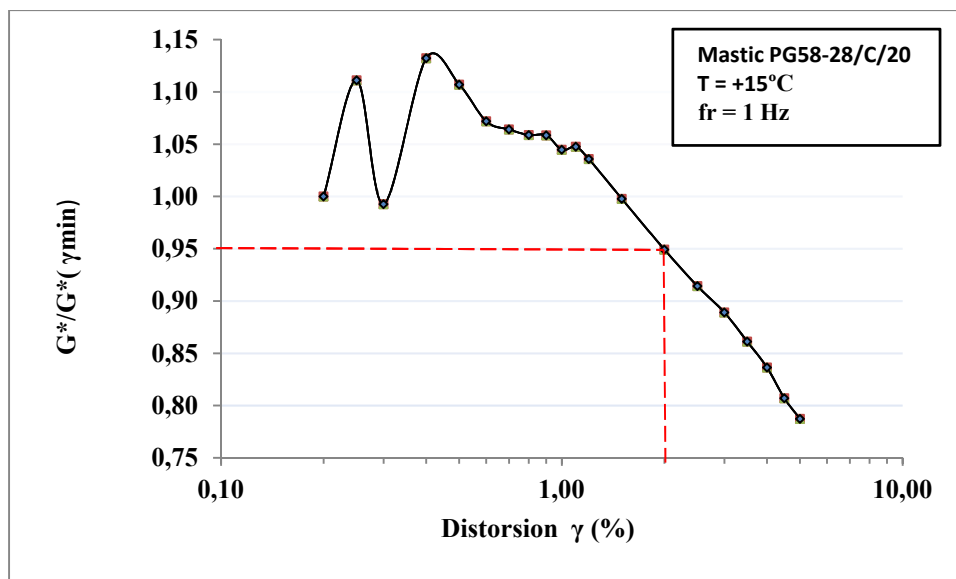


Figure-A III- 5 Linéarité mastic PG 58-28/C/20 (T = +15 °C et fr = 1 Hz)

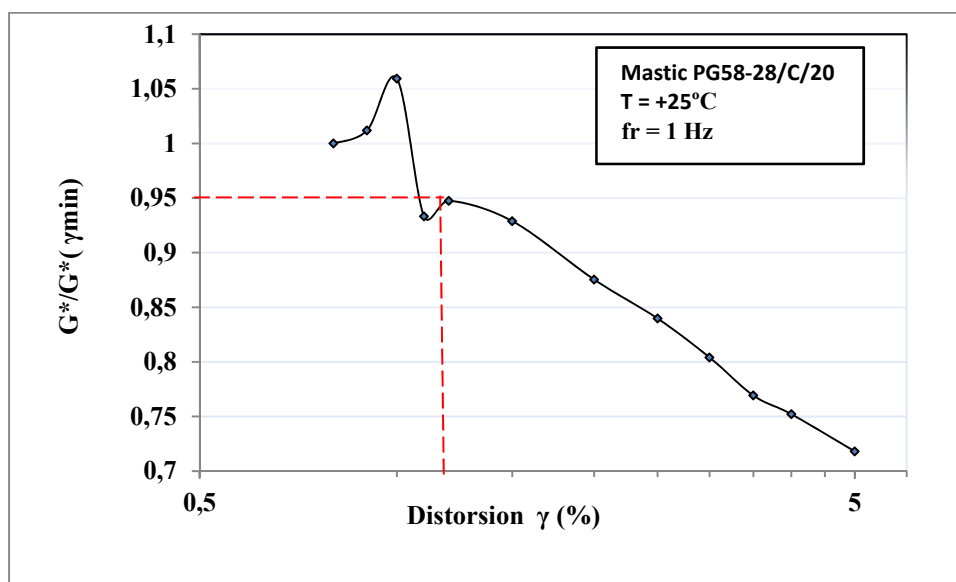


Figure-A III- 6 Linéarité mastic PG 58-28/C/20 (T = +25 °C et fr = 1 Hz)

ANNEXE IV

DISTORSIONS IMPOSÉES LORS DE L'ESSAI DE CISAILLEMENT ANNULAIRE

- $T = +55\text{ °C}$ $fr = 1\text{ Hz}$ $\gamma_{lin}(1\text{ Hz}) = 3\text{ \%}$

fr(Hz)	γ (%)	$\Delta l(\mu\text{m})$	N (cycles)
0,03	9	450	8
0,1	4,8	240	8
0,3	3,6	180	18
1	3	150	18
3	2,4	120	39
10	1,2	60	39

- $T = +45\text{ °C}$ $fr = 1\text{ Hz}$ $\gamma_{lin}(1\text{ Hz}) = 2,5\text{ \%}$

fr(Hz)	γ (%)	$\Delta l(\mu\text{m})$	N (cycles)
0,03	7,5	375	8
0,1	4	200	8
0,3	3	150	18
1	2,5	125	18
3	2	100	39
10	1	50	39

- $T = +35\text{ }^{\circ}\text{C}$ $fr = 1\text{ Hz}$ $\gamma_{lin}(1\text{ Hz}) = 2\text{ \%}$

fr(Hz)	γ (%)	$\Delta l(\mu\text{m})$	N (cycles)
0,03	6	300	8
0,1	3,2	160	8
0,3	2,4	120	18
1	2	100	18
3	1,6	80	39
10	0,8	40	39

- $T = +25\text{ }^{\circ}\text{C}$ $fr = 1\text{ Hz}$ $\gamma_{lin}(1\text{ Hz}) = 1,3\text{ \%}$

fr(Hz)	γ (%)	$\Delta l(\mu\text{m})$	N (cycles)
0,03	3,96	195	8
0,1	2,08	104	8
0,3	1,56	78	18
1	1,3	65	18
3	1,04	52	39
10	0,52	26	39

- $T = +15\text{ }^{\circ}\text{C}$ $fr = 1\text{ Hz}$ $\gamma_{lin}(1\text{ Hz}) = 1\text{ \%}$

fr(Hz)	γ (%)	$\Delta l(\mu\text{m})$	N (cycles)
0,03	3	150	8
0,1	1,6	80	8
0,3	1,2	60	18
1	1	50	18
3	0,8	40	39
10	0,4	20	39

- $T = +5\text{ }^{\circ}\text{C}$ $fr = 1\text{ Hz}$ $\gamma_{lin}(1\text{ Hz}) = 0,8\text{ }%$

fr(Hz)	γ (%)	$\Delta l(\mu\text{m})$	N (cycles)
0,03	2,4	120	8
0,1	1,28	64	8
0,3	0,96	48	18
1	0,8	40	18
3	0,64	32	39
10	0,32	16	39

- $T = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$ $fr = 1\text{ Hz}$ $\gamma_{lin}(1\text{ Hz}) = 0,8\text{ }%$

fr(Hz)	γ (%)	$\Delta l(\mu\text{m})$	N (cycles)
0,03	2,4	120	8
0,1	1,28	64	8
0,3	0,96	48	18
1	0,8	40	18
3	0,64	32	39
10	0,32	16	39

- $T = -15\text{ }^{\circ}\text{C}$ $fr = 0,1\text{ Hz}$ $\gamma_{lin}(1\text{ Hz}) = 0,6\text{ }%$

fr(Hz)	γ (%)	$\Delta l(\mu\text{m})$	N (cycles)
0,03	1,11	56	8
0,1	0,6	30	8
0,3	0,44	22	18
1	0,37	19	18
3	0,3	15	39
10	0,15	8	39

- $T = -25\text{ }^{\circ}\text{C}$ $f_r = 0,1\text{ Hz}$ $\gamma_{\text{lin}}(1\text{ Hz}) = 0,4\text{ \%}$

f_r(Hz)	γ (%)	Δl(μm)	N (cycles)
0,03	0,75	37,5	8
0,1	0,4	20	8
0,3	0,3	15	18
1	0,25	12,5	18
3	0,2	10	39
10	0,1	5	39

ANNEXE V

FICHES TECHNIQUES DES MATÉRIAUX UTILISÉS



11701, Sherbrooke est
Montréal, (QC) H1S 1C3
Téléphone: 514 640-8100
Télécopieur: 514 640-8328

CERTIFICAT D'ANALYSE

LIANT BITUMINEUX

Conforme à la norme québécoise 4101

INFORMATION SUR LA SOURCE D'ORIGINE			
Nom de la source première :		Lot No.:	
T.M.E., Montréal		14128	
Adresse:		Réf. No.:	
Terminal TME Montréal-Est, Que., Canada		14092724	
Installation (Cochez une):		Nom :	Réservoir No.:
Raffiné: <input type="checkbox"/>	Dépôt: <input checked="" type="checkbox"/>	PO58-28	TME_16
Liant de Pavage de Type (Cochez un):		Quantité en	
Pur: <input checked="" type="checkbox"/>	Modifié: <input type="checkbox"/>	Litres @ 15.67°C: 17064902	
Laboratoire Accrédité AASHTO		Date	Date
		Échantillonné: 2014/09/25	Analysé: 2014/09/25

Essai	Méthode	Spécifications	Résultats
Liant d'origine			
Point d'Éclair	ASTM D 92	> 230 °C	294
Viscosité "Brookfield" @ 135 °C, Pa-s	AASHTO T 315	< 3 Pa-s	0.287
Viscosité "Brookfield" @ 165 °C, Pa-s	AASHTO T 315	Indiquer	0.066
Cisaillement Dynamique, 10 rad/sec	AASHTO T 315	> 1.00 kPa	G' δ
G' / sin δ & δ @ T °C, kPa		58 °C	1.11 83.1
Valeur de T ₀			58.8 °C
Liant vieilli à court terme (RTFO)			
Variation de masse, %	AASHTO T240	1.00 % pds max.	-0.502
Cisaillement Dynamique, 10 rad/sec	AASHTO T 315	> 2.20 kPa	
G' / sin δ @ T °C, kPa		58 °C	4.70
Liant vieilli à long terme (PAV)			
Cisaillement Dynamique, 10 rad/sec	AASHTO T 315	< 5000 kPa	
G' x sin δ @ T °C, kPa		19 °C	2930
Flexion de poutre & valeur de m, 60 sec.	AASHTO T 312	< 300 MPa > 0.300	S m
@ T °C		-18 °C	129 0.307
Valeur de T _b			-29.8 °C



11 701, rue Sherbrooke est
Montréal, (Qc) H1B 1G3
Téléphone: 514 940-8189
Télécopieur: 514 940-8328

ATTESTATION DE CONFORMITÉ

LIANT BITUMEUX

No. attestation de conformité
14126 -2

INFORMATIONS GÉNÉRALES		RECOMMANDATIONS - TEMPÉRATURES D'UTILISATION (1)	
Distributeur et lieu d'emballage et d'expédition T.M.E., Montréal		Métro	Métro
Fabricant et lieu de fabrication Suncor Énergie, Raffinerie de Montréal	Emballage (°C)	138	170
Classe de bitume PG58-28	Non commercial	Mélange (°C)	138 163
Date de fabrication 2014/09/26	No. de lot 14126 -2		
RÉSULTATS DES ESSAIS DE CARACTÉRISATION		RÉSULTATS DES ESSAIS DE CONTRÔLE	
Date des essais de caractérisation	2014/09/26	Date du contrôle	2014/10/09
Masse volumique @ 15° C (g/cm3)	1.0212	Recouvrance d'élasticité @ 10° C (%)	N/A
Stabilité au stockage (°C)	0.1	2° / sin(2), bitume d'origine (kPa)	1.13
Recouvrance d'élasticité @ 10° C (%)	N/A	Module de rigidité 8s (k) (MPa)	48
Viscosité Brookfield @ 135°C (Pa.s)	0.267	Perte m.c (H)	0.463
Viscosité Brookfield @ 165°C (Pa.s)	0.086	Temp. élevée de caractérisation Ta (°C)	59.8
Temp. élevée de caractérisation Ta (°C)	59.8	EXPÉDITION	
Temp. basse de caractérisation Tb (°C)	-29.6	Nom et nom de la centrale d'emballage	
Module de rigidité 8s (MPa)	47	Transporteur	
Perte m.c	0.464		
Teneur en cendres (%)	0.06		
Variation de masse au RTOT (%)	-0.562	No. de la citerne	Date du chargement
			Quantité livrée
			Kg
MSR	Recouvrance d'élasticité à 3.2 kPa (%)	8	Note (1) Températures calculées selon L.O. 28-007.
à	Conspicuité non-recouvrable à 3.2 kPa (kPa)	1.78	
58	Conspicuité non-recouvrable (99%) (kPa) (%)	36.1	

ANNEXE VI

HOMOGENÉITÉ DES MASTICS BITUMINEUX

1. Référence

Aucune référence n'est requise pour cette méthode d'essai.

2. Appareillage

Cette méthode d'essai utilise les appareils et outils suivants :

- bécher avec bec verseur de 500 ml de 9,5 cm de diamètre;
- tige de verre (environ 7 mm de diamètre et 24 cm de hauteur);
- plaque chauffante pouvant maintenir une température de $150^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$;
- cuillère métallique résistant à 150°C ;
-  tuve capable de maintenir une température de $150^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$;
- four à ignition capable de maintenir une température de $580^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$;
- balance précise à $\pm 0,01\text{g}$ ($\pm 0,001\text{g}$ de préférence);
- 5 moules cylindriques en aluminium pour la préparation des éprouvettes ayant les dimensions approximatives suivantes :
 - diamètre : 2,5 cm
 - hauteur : 15 cm
- ciseaux métalliques;
- frigo capable de maintenir une température de 3°C ;
- tamis de $315\text{ }\mu\text{m}$;
- supports métalliques de moules cylindriques en aluminium;
- creuset en porcelaine de 220 ml à fond plat ayant les dimensions approximatives suivantes :
 - diamètre inférieur : 5,5 cm
 - diamètre supérieur : 11,5 cm
 - hauteur : 5 cm
- gants de laboratoire résistant au bitume et à la chaleur.

3. Calcul des constituants :

Pour préparer les 5 éprouvettes, il faut un total de 250 ml de mastic. Pour ce faire, un mélange de 500 ml est requis pour compenser les pertes.

- on considère une masse initiale de bitume (m_b) de 350 g ;
- on calcule la masse de fillers (m_f) suivant le pourcentage ciblé dans le mastic (F)   l'aide de l'équation suivante :

$$m_f = \left(\frac{d_f}{d_b} \right) \left(\frac{C_f}{1 - C_f} \right) m_b \quad (\text{A VI-1})$$

Avec :

- m_b : masse du bitume
- m_f : masse des fillers
- d_b : densité du bitume
- d_f : densité des fillers
- C_f : fraction volumique des fillers

Dans notre cas, le mastic est constitué du bitume PG 58-28 de densité $d_b = 1,020$ et des fillers de verre A de densité $d_f = 2,532$ à concentration volumique $C_f = 15 \%$, la masse de fillers requise est :

$$m_f = \left(\frac{2,532}{1,020} \right) \times \left(\frac{0,15}{1 - 0,15} \right) \times 350 = 153,32 \text{ g} \quad (\text{A VI-2})$$

1. Préparation de l'échantillon

Le Tableau A VI-1 indique la granulométrie du verre A :

Tableau-A VI-1 Granulométrie du verre A
Adapté de Lachance-Tremblay (2014)

Type	Verre A	
Densité	2,532	
% Absorption	0,072	
Diamètre moyen	0,0736	
Granulométrie	Tamis (mm)	Passants (%)
	28	100
	20	100
	14	100
	10	100
	5	100
	2,5	100
	1,25	100
	0,63	100
	0,315	100
	0,16	92,3
	0,08	65,8
	0,061	51,6
	0,045	36,2
	0,033	25,2
	0,214	15,4
	0,0125	9,9
	0,0089	7,7
	0,0064	5,5
	0,0046	3,3
	0,0033	2,2
	0,0023	2,2
	0,0015	2,2

Suite au tamisage du verre A au tamis 315 μm :

- chauffer le bitume, les fillers, le bécher à bec verseur, la tige de verre, la cuillère métallique, les 5 moules cylindriques en aluminium et leurs supports dans l  tuve   150  C pendant 2 heures jusqu'à ce que le bitume soit aisément manipulable et pour éviter les chocs thermiques entre matériaux et matériels;
- allumer la plaque chauffante à 150  C;

- placer le bécher à bec verseur de 500 ml sur la balance et tarer;
- verser une masse de 350 g de bitume chauffé puis tarer la balance;
-   l'aide de la cuillère métallique, intégrer progressivement, une masse de 153,32 g de filler de verre A chauffés, au bitume;
- apposer le bécher contenant le bitume et les fillers de verre A sur la plaque chauffante à 150  C.   l'aide de la tige de verre, malaxer manuellement le bitume et les fillers jusqu'à obtention d'un rendu homogène (environ 3 minutes);
- suite au malaxage de l'échantillon, placer le bécher à bec verseur contenant le mastic dans l'étuve à 150  C.

2. Mode op ratore

- peser les moules cylindriques en aluminium 1 et 2 sur leur support et tarer la balance (*Voir Figure A VI-1*) ;



Figure-A VI-1 pesage des moules cylindriques

- verser une masse de mastic préparé de 50 ± 3 g dans chaque moule;



Figure-A VI-2 Coulage du mastic

- peser les moules cylindriques en aluminium 3 et 4 sur leur support et tarer la balance;
- verser une masse de mastic préparé de 50 ± 3 g dans chaque moule;
- peser le moule cylindrique en aluminium 5 sur son support et tarer la balance;
- verser une masse de mastic préparé de 50 ± 3 g;
- laisser refroidir les 5 éprouvettes de mastic sur leurs supports pendant 10 ± 2 h dans une position verticale afin de favoriser la migration des fillers dans le bitume (pour vérifier par la suite l'homogénéité du mastic);



Figure-A VI-3 Les 5 éprouvettes de l'essai d'homogénéité du mastic PG 58-28/VA/15

- placer les 5 moules sur leurs supports au frigo à -5°C pendant 2 heures;
- suite à la congélation des 5 éprouvettes de mastic, ressortir le moule 1 du frigo, le découper en 3 sections quasi-identiques et noter H pour la section du haut, M pour la section du milieu et B pour la section du bas;

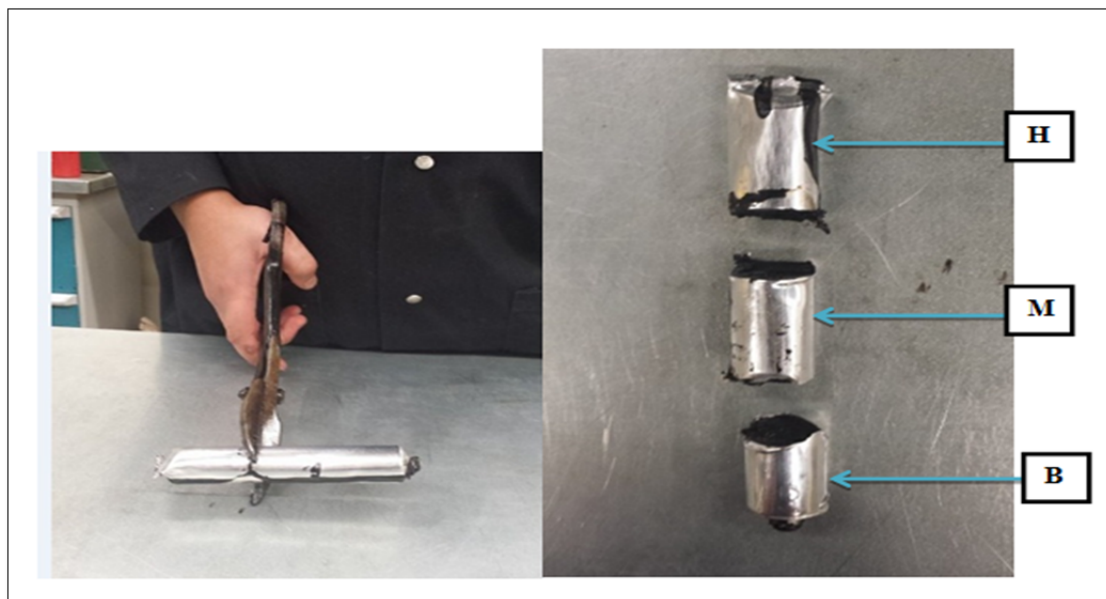


Figure-A VI-4 Découpage des éprouvettes

- remettre la section M et B au frigo et démouler la section H (*Voir Figure A VI-5*);

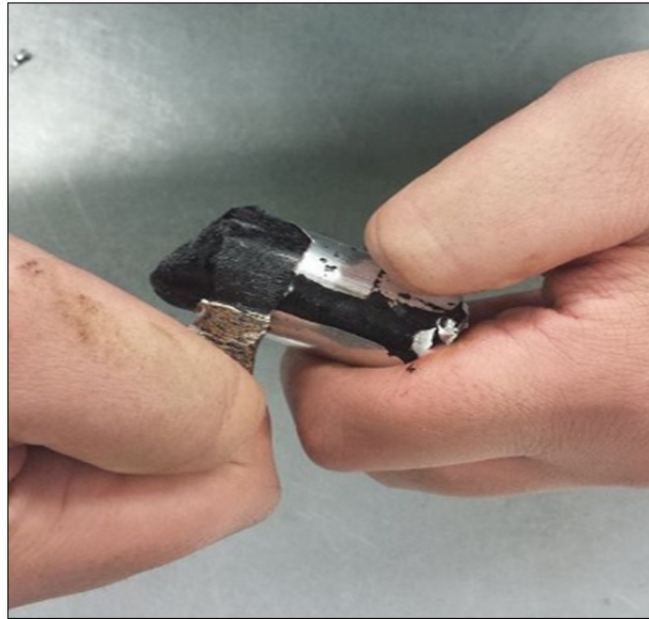


Figure-A VI-5 Démoulage de la section de l'éprouvette

- placer le creuset dans le four à ignition et le chauffer à 580 °C pendant 1 min afin de brûler toute impureté. Laisser refroidir le creuset à température ambiante;
- peser le creuset vide et noter la masse M_c avec une précision de $\pm 0,01$ g;



Figure-A VI-6 Creuset

- tarer la balance puis peser le mastic et noter la masse M_m avec une précision de 0,01 g;



Figure-A VI-7 Pesage de la section
avant calcination

- calciner le creuset et son contenu à 580 °C pendant 3 à 4 heures;



Figure-A VI-8 Four à ignition

- laisser refroidir le creuset contenant les fillers à température ambiante et peser à nouveau M_{f+c} avec une précision de 0,01 g.

Note :

Si le résultat de la teneur en fillers semble anormalement élevé, ou il existe encore des traces noires de bitume, remettre le creuset et son contenu dans le four à moufle à 580 °C pour une durée supplémentaire de 30 minutes. Laisser refroidir à température ambiante et peser à nouveau.

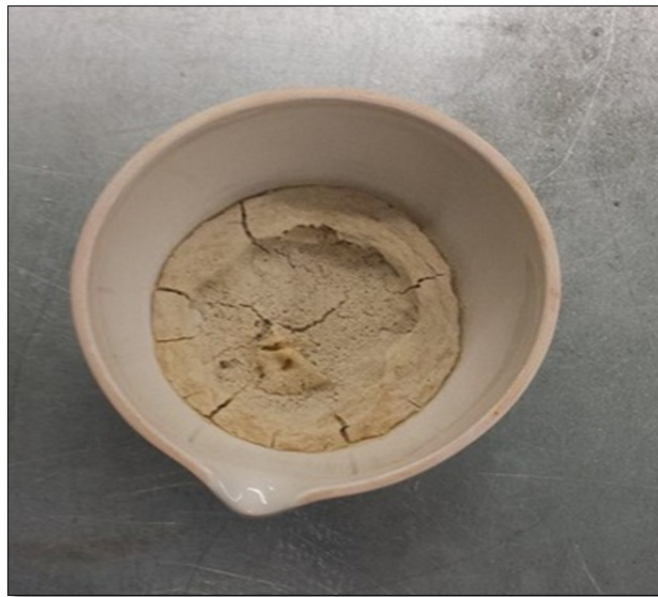


Figure-A VI-9 Fillers obtenus après calcination

- refaire les 6 dernières étapes pour toutes les autres sections.

3. Calculs et expressions des résultats

- $M_f = M_{f+c} - M_c \Rightarrow V_f = \frac{M_f}{d_f}$
- $M_b = M_m - M_f \Rightarrow V_b = \frac{M_b}{d_b}$
- $\% \text{ fillers} = \frac{V_f}{V_f + V_b} \times 100$

Avec :

M_c : masse du creuset

M_m : masse du mastic

M_b : masse de bitume brûlé
 M_{f+c} : masse des fillers et du creuset
 M_f : masse des fillers
 V_b : volume du bitume brûlé
 V_f : volume des fillers
 $\%_{fillers}$: teneur en fillers
 d_f : densité des fillers = 2,532
 d_b : densité du bitume = 1,02

4. Présentation des résultats

Les détails de calcul sont donnés ci-après :

Tableau-A VI-2 Pourcentage de fillers obtenu dans chaque section après

⇒

		$M_c(g)$	$M_m(g)$	$M_{c+f}(g)$	$M_f(g)$	$M_b(g)$	$V_f(ml)$	$V_b(ml)$	$\%_{fillers}$
Éprouvette 1	H	160,5	18,04	166,2	5,7	12,34	2,251185	12,09804	15,6
	M	160,43	18,62	166,31	5,88	12,74	2,322275	12,4902	15,6
	B	160,45	16,67	165,76	5,31	11,36	2,097156	11,13725	15,8
Éprouvette 2	H	160,5	17,5	166,03	5,53	11,97	2,184044	11,73529	15,6
	M	160,47	17,71	166,11	5,64	12,07	2,227488	11,83333	15,8
	B	160,51	16,65	165,79	5,28	11,37	2,085308	11,14706	15,7
Éprouvette 3	H	160,52	21,73	167,22	6,7	15,03	2,64613	14,73529	15,2
	M	160,33	19,72	166,42	6,09	13,63	2,405213	13,36275	15,2
	B	160,44	18,96	166,54	6,1	12,86	2,409163	12,60784	16,0
Éprouvette 4	H	160,52	20,98	167,06	6,54	14,44	2,582938	14,15686	15,4
	M	160,44	23,41	167,95	7,51	15,9	2,966035	15,58824	15,9
	B	160,47	19,28	166,65	6,18	13,1	2,440758	12,84314	15,9
Éprouvette 5	H	160,47	28,2	169,46	8,99	19,21	3,550553	18,83333	15,8
	M	160,51	18,52	166,34	5,83	12,69	2,302528	12,44118	15,6
	B	160,47	18,63	166,46	5,99	12,64	2,365719	12,39216	16,03021

⇒ **Éprouvette 1**

• **Section du haut (H)**

$$M_c = 160,50 \text{ g}$$

$$M_m = 18,04 \text{ g}$$

$$M_{f+c} = 166,20 \text{ g}$$

$$M_f = M_{f+c} - M_c = 166,20 - 160,50 = 5,70 \text{ g} \Rightarrow V_f = \frac{M_f}{d_f} = \frac{5,70}{2,532} = 2,251 \text{ ml}$$

$$M_b = M_m - M_f = 18,04 - 5,70 = 12,34 \text{ g} \Rightarrow V_b = \frac{M_b}{d_b} = \frac{12,34}{1,02} = 12,098 \text{ ml}$$

$$\% \text{ fillers} = \frac{V_f}{V_f + V_b} \times 100 = \frac{2,251}{2,251 + 12,098} = 15,68$$

• **Section du milieu (M)**

$$M_c = 160,43 \text{ g}$$

$$M_m = 18,62 \text{ g}$$

$$M_{f+c} = 166,31 \text{ g}$$

$$M_f = M_{f+c} - M_c = 166,31 - 160,43 = 5,88 \text{ g} \Rightarrow V_f = \frac{M_f}{d_f} = \frac{5,88}{2,532} = 2,322 \text{ ml}$$

$$M_b = M_m - M_f = 18,62 - 5,88 = 12,74 \text{ g} \Rightarrow V_b = \frac{M_b}{d_b} = \frac{12,74}{1,02} = 12,49 \text{ ml}$$

$$\% \text{ fillers} = \frac{V_f}{V_f + V_b} \times 100 = \frac{2,322}{2,322 + 12,49} = 15,67$$

• **Section du bas (B)**

$$M_c = 160,45 \text{ g}$$

$$M_m = 16,67 \text{ g}$$

$$M_{f+c} = 165,76 \text{ g}$$

$$M_f = M_{f+c} - M_c = 165,76 - 160,45 \text{ g} = 5,31 \text{ g} \Rightarrow V_f = \frac{M_f}{d_f} = \frac{5,31}{2,532} = 2,097 \text{ ml}$$

$$M_b = M_m - M_f = 16,67 - 5,31 = 11,36 \text{ g} \Rightarrow V_b = \frac{M_b}{d_b} = \frac{11,36}{1,02} = 11,137 \text{ ml}$$

$$\% \text{ fillers} = \frac{V_f}{V_f + V_b} \times 100 = \frac{2,097}{2,097 + 11,137} = 15,84$$

⇒ **Éprouvette 2**

• **Section du haut (H)**

$$M_c = 160,50 \text{ g}$$

$$M_m = 17,50 \text{ g}$$

$$M_{f+c} = 166,03 \text{ g}$$

$$M_f = M_{f+c} - M_c = 166,03 - 160,50 = 5,53 \text{ g} \Rightarrow V_f = \frac{M_f}{d_f} = \frac{5,53}{2,532} = 2,184 \text{ ml}$$

$$M_b = M_m - M_f = 17,50 - 5,53 = 11,97 \text{ g} \Rightarrow V_b = \frac{M_b}{d_b} = \frac{11,97}{1,02} = 11,735 \text{ ml}$$

$$\% \text{ fillers} = \frac{V_f}{V_f + V_b} \times 100 = \frac{2,184}{2,184 + 11,735} = 15,69$$

- **Section du milieu (M)**

$$M_c = 160,47 \text{ g}$$

$$M_m = 17,71 \text{ g}$$

$$M_{f+c} = 166,11 \text{ g}$$

$$M_f = M_{f+c} - M_c = 166,11 - 160,47 = 5,64 \text{ g} \Rightarrow V_f = \frac{M_f}{d_f} = \frac{5,64}{2,532} = 2,227 \text{ ml}$$

$$M_b = M_m - M_f = 17,71 - 5,64 = 12,07 \text{ g} \Rightarrow V_b = \frac{M_b}{d_b} = \frac{12,07}{1,02} = 11,833 \text{ ml}$$

$$\% \text{ fillers} = \frac{V_f}{V_f + V_b} \times 100 = \frac{2,227}{2,227 + 11,833} = 15,84$$

- **Section du bas (B)**

$$M_c = 160,51 \text{ g}$$

$$M_m = 16,65 \text{ g}$$

$$M_{f+c} = 165,79 \text{ g}$$

$$M_f = M_{f+c} - M_c = 165,79 - 160,51 = 5,28 \text{ g} \Rightarrow V_f = \frac{M_f}{d_f} = \frac{5,28}{2,532} = 2,085 \text{ ml}$$

$$M_b = M_m - M_f = 16,65 - 5,28 = 11,37 \text{ g} \Rightarrow V_b = \frac{M_b}{d_b} = \frac{11,37}{1,02} = 11,147 \text{ ml}$$

$$\% \text{ fillers} = \frac{V_f}{V_f + V_b} \times 100 = \frac{2,085}{2,085 + 11,147} = 15,75$$

⇒ **Éprouvette 3**

- **Section du haut (H)**

$$M_c = 160,52 \text{ g}$$

$$M_m = 21,73 \text{ g}$$

$$M_{f+c} = 167,22 \text{ g}$$

$$M_f = M_{f+c} - M_c = 167,22 - 160,52 = 6,7 \text{ g} \Rightarrow V_f = \frac{M_f}{d_f} = \frac{6,7}{2,532} = 2,646 \text{ ml}$$

$$M_b = M_m - M_f = 21,73 - 6,7 = 15,03 \text{ g} \Rightarrow V_b = \frac{M_b}{d_b} = \frac{15,03}{1,02} = 14,735 \text{ ml}$$

$$\% \text{ fillers} = \frac{V_f}{V_f + V_b} \times 100 = \frac{2,646}{2,646 + 14,735} = 15,22$$

- **Section du milieu (M)**

$$M_c = 160,33 \text{ g}$$

$$M_m = 19,72 \text{ g}$$

$$\begin{aligned}
M_{f+c} &= 166,42 \text{ g} \\
M_f &= M_{f+c} - M_c = 166,42 - 160,33 = 6,09 \text{ g} \Rightarrow V_f = \frac{M_f}{d_f} = \frac{6,09}{2,532} = 2,405 \text{ ml} \\
M_b &= M_m - M_f = 19,72 - 6,09 = 13,63 \text{ g} \Rightarrow V_b = \frac{M_b}{d_b} = \frac{13,63}{1,02} = 13,362 \text{ ml} \\
\% \text{ fillers} &= \frac{V_f}{V_f + V_b} \times 100 = \frac{2,405}{2,405 + 13,362} = 15,25
\end{aligned}$$

• **Section du bas (B)**

$$\begin{aligned}
M_c &= 160,44 \text{ g} \\
M_m &= 18,96 \text{ g} \\
M_{f+c} &= 166,54 \text{ g} \\
M_f &= M_{f+c} - M_c = 166,54 - 160,44 = 6,10 \text{ g} \Rightarrow V_f = \frac{M_f}{d_f} = \frac{6,10}{2,532} = 2,409 \text{ ml} \\
M_b &= M_m - M_f = 18,96 - 6,10 = 12,86 \text{ g} \Rightarrow V_b = \frac{M_b}{d_b} = \frac{12,86}{1,02} = 12,607 \text{ ml} \\
\% \text{ fillers} &= \frac{V_f}{V_f + V_b} \times 100 = \frac{2,409}{2,409 + 12,607} = 16,04
\end{aligned}$$

⇒ **Éprouvette 4**

• **Section du haut (H)**

$$\begin{aligned}
M_c &= 160,52 \text{ g} \\
M_m &= 20,98 \text{ g} \\
M_{f+c} &= 167,06 \text{ g} \\
M_f &= M_{f+c} - M_c = 167,06 - 160,52 = 6,54 \text{ g} \Rightarrow V_f = \frac{M_f}{d_f} = \frac{6,54}{2,532} = 2,582 \text{ ml} \\
M_b &= M_m - M_f = 20,98 - 6,54 = 14,44 \text{ g} \Rightarrow V_b = \frac{M_b}{d_b} = \frac{14,44}{1,02} = 14,156 \text{ ml} \\
\% \text{ fillers} &= \frac{V_f}{V_f + V_b} \times 100 = \frac{2,582}{2,582 + 14,156} = 15,42
\end{aligned}$$

• **Section du milieu (M)**

$$\begin{aligned}
M_c &= 160,44 \text{ g} \\
M_m &= 23,41 \text{ g} \\
M_{f+c} &= 167,95 \text{ g} \\
M_f &= M_{f+c} - M_c = 167,95 - 160,44 = 7,51 \text{ g} \Rightarrow V_f = \frac{M_f}{d_f} = \frac{7,51}{2,532} = 2,966 \text{ ml} \\
M_b &= M_m - M_f = 23,41 - 7,51 = 15,9 \text{ g} \Rightarrow V_b = \frac{M_b}{d_b} = \frac{15,9}{1,02} = 15,58 \text{ ml} \\
\% \text{ fillers} &= \frac{V_f}{V_f + V_b} \times 100 = \frac{2,966}{2,966 + 15,58} = 15,98
\end{aligned}$$

- **Section du bas (B)**

$$M_c = 160,47 \text{ g}$$

$$M_m = 19,28 \text{ g}$$

$$M_{f+c} = 166,65 \text{ g}$$

$$M_f = M_{f+c} - M_c = 166,65 - 160,47 = 6,18 \text{ g} \Rightarrow V_f = \frac{M_f}{d_f} = \frac{6,18}{2,532} = 2,440 \text{ ml}$$

$$M_b = M_m - M_f = 19,28 - 6,18 = 13,1 \text{ g} \Rightarrow V_b = \frac{M_b}{d_b} = \frac{13,1}{1,02} = 12,84 \text{ ml}$$

$$\% \text{ fillers} = \frac{V_f}{V_f + V_b} \times 100 = \frac{2,440}{2,440 + 12,84} = 15,96$$

⇒ **Éprouvette 5**

- **Section du haut (H)**

$$M_c = 160,47 \text{ g}$$

$$M_m = 28,20 \text{ g}$$

$$M_{f+c} = 169,46 \text{ g}$$

$$M_f = M_{f+c} - M_c = 169,46 - 160,47 = 8,99 \text{ g} \Rightarrow V_f = \frac{M_f}{d_f} = \frac{8,99}{2,532} = 3,550 \text{ ml}$$

$$M_b = M_m - M_f = 28,20 - 8,99 = 19,21 \text{ g} \Rightarrow V_b = \frac{M_b}{d_b} = \frac{19,21}{1,02} = 18,833 \text{ ml}$$

$$\% \text{ fillers} = \frac{V_f}{V_f + V_b} \times 100 = \frac{3,550}{3,550 + 18,833} = 15,86$$

- **Section du milieu (M)**

$$M_c = 160,51 \text{ g}$$

$$M_m = 18,52 \text{ g}$$

$$M_{f+c} = 166,34 \text{ g}$$

$$M_f = M_{f+c} - M_c = 166,34 - 160,51 = 5,83 \text{ g} \Rightarrow V_f = \frac{M_f}{d_f} = \frac{5,83}{2,532} = 2,302 \text{ ml}$$

$$M_b = M_m - M_f = 18,52 - 5,83 = 12,69 \text{ g} \Rightarrow V_b = \frac{M_b}{d_b} = \frac{12,69}{1,02} = 12,441 \text{ ml}$$

$$\% \text{ fillers} = \frac{V_f}{V_f + V_b} \times 100 = \frac{2,302}{2,302 + 12,441} = 15,61$$

- **Section du bas (B)**

$$M_c = 160,47 \text{ g}$$

$$M_m = 18,63 \text{ g}$$

$$M_{f+c} = 166,46 \text{ g}$$

$$M_f = M_{f+c} - M_c = 166,46 - 160,47 = 5,99 \text{ g} \Rightarrow V_f = \frac{M_f}{d_f} = \frac{5,99}{2,532} = 2,365 \text{ ml}$$

$$M_b = M_m - M_f = 18,63 - 5,99 = 12,64 \text{ g} \Rightarrow V_b = \frac{M_b}{d_b} = \frac{12,64}{1,02} = 12,392 \text{ ml}$$

$$\% \text{ fillers} = \frac{V_f}{V_f + V_b} \times 100 = \frac{2,365}{2,365 + 12,392} = 16,03$$

ANNEXE VII

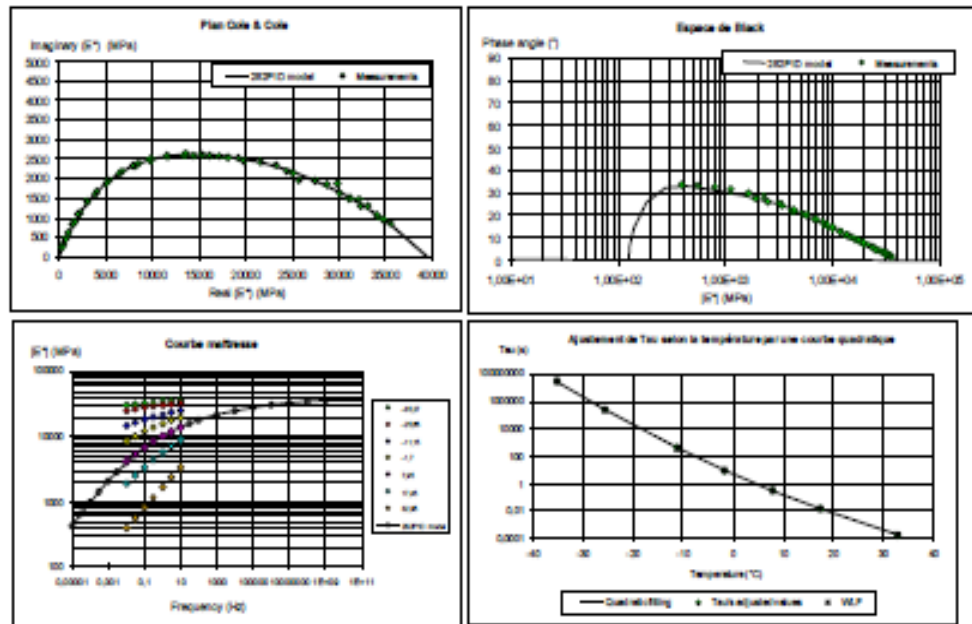
PROCÉDURE D'UTILISATION DU MODÈLE 2S2P1D

PROCÉDURE

DÉTERMINATION DES PARAMÈTRES 2S2P1D AVEC LES RÉSULTATS D'ESSAI DU MODULE COMPLEXE (E')

IB (MPa)	IBel (MPa)	b	b ₁	Delta ₁	Delta ₂	1/(T _g)	T _g	A0	A1	A2	C1	C2
125	39506	0,144	0,412	2,42	2000	0,29	7,95	1,59	-4,376	0,06198	30,9	210

Modélisation de la rhéologie de l'enrobé



Rédigé par : Sébastien Lamothe

6 août 2009

1. Ouverture du fichier 2S2P1D

- Ouvrir la dernière version du fichier : "2S2P1D_WLF_3D_Avril2006"

2. Importation des résultats d'essai vers le fichier "2S2P1D"

- Importer les valeurs de module complexe (E^*), de l'angle de déphasage (ϕ (δ)) obtenues en fonction des températures et des fréquences d'essai.

3. Articles de référence

Afin de bien comprendre et de trouver des valeurs adéquates des paramètres du modèle "2S2P1D", veuillez consulter les articles suivants :

- 1) OLARD, F. et H. DI BENEDETTO. General "2S2P1D" model and relation between the linear viscoelastic behaviors of bituminous binders and mixes. Road Materials and Pavements Design, volume 4, n° 2, 2003, pp. 1-40.
- 2) DI BENEDETTO H., OLARD F., SAUZEAT C. and B. DELAPORTE. "Linear viscoelastic behavior of bituminous materials : from binders to mixes", European Asphalt Technology Association, Nottingham, Published in the International Journal of Road Materials and Pavement Design, Vol.5, Special Issue, 2004, pp. 163-202.
- 3) OLARD F., DI BENEDETTO H., ECKMANN, B. and J-P. TRIQUINEAUX. "Linear viscoelastic properties of bituminous binders and mixtures at low and intermediate temperatures", Road Materials and Pavement Design, Vol. 4, n° 1, 2003, pp. 77-107.

4. Modèle 2S2P1D

Ce modèle est utilisé pour représenter le comportement des bitumes et des enrobés dans le domaine visco-élastique linéaire (VEL). Ce modèle est appelé 2S2P1D car il est constitué de "2 Springs" (ressort), "2 Parabolic" (élément parabolique) et "1 linear Dashpot" (amortisseur). La figure 4.1 illustre schématiquement ce modèle.

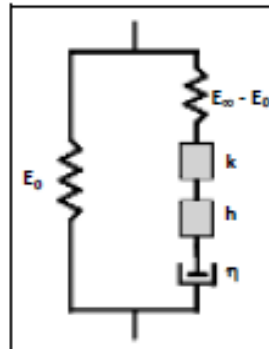


Figure 4.1 Modèle 2S2P1D

Par ailleurs, le module complexe du modèle 2S2P1D s'exprime sous la forme :

$$E^*(i\omega\tau) = E_0 + \frac{E_{\infty} - E_0}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h} + (i\omega\beta\tau)^{-1}} \quad (4.1)$$

- i : Nombre complexe défini par $i^2 = -1$,
- E_0 : Module statique (valeur minimale du module, enrobés soumis à des basses fréquences ($\omega \rightarrow 0$) et des hautes températures),
- E_{∞} : Module instantané ou vitreux (valeur maximale du module, enrobés soumis à des très hautes fréquences ($\omega \rightarrow \infty$) et/ou des basses températures),
- ω : Pulsation = $2\pi F_r$,
- F_r : Fréquence
- τ : Paramètre ayant la dimension de temps et qui s'apparente à un temps de retard dont la valeur varie avec la température,
- δ (delta) : Constante,
- h, k : Paramètres (constantes) des éléments paraboliques du modèle ($0 < k < h < 1$),
- β (beta) : Constante sans dimensions,
- η : Viscosité newtonienne $\eta = (E_{\infty} - E_0) \beta \tau$ quand $\omega \rightarrow 0$.

En outre, si l'hypothèse d'un comportement thermo-rhéologique simple visco-élastique linéaire peut être appliquée au matériau considéré, c.-à-d. que le Principe d'Équivalence Temps-Température (PETT) est valide, seul le paramètre τ dépend de la température, l'évolution de τ peut être rapprochée par une loi de type WLF dans la gamme de température observée dans le laboratoire.

$$\tau(T) = a_T(T) \times \tau_0 \quad (4.2)$$

$$\log(a_T) = \frac{-C_1(T - T_2)}{C_2 + (T - T_2)} \quad (4.3)$$

$a_T(T)$: Facteur de calage à la température T ,

$\tau_0 = \tau(T_*)$: Déterminé à la température de référence T_* , qui est habituellement 10°C pour les enrobés et 25°C pour les bitumes,

T_* : Température de référence (constante),

C_1, C_2 : Constantes.

5. Précisions sur les paramètres 2S2P1D

Certaines précisions peuvent être spécifiées :

- Les bitumes utilisés au Québec sont plus mous que ceux utilisés en France.
- Les valeurs de δ , k , h et β seront les mêmes pour le bitume et l'enrobé constitué avec ce bitume (figure 5.1). A cet effet, des valeurs similaires devraient être obtenues pour différents enrobés constitués avec un même bitume. Toutefois, cet argument ne tient pas compte de l'influence du vieillissement.
- La valeur du module statique (E_0) est supposée représenter l'interaction entre les particules granulaires quand la contribution du bitume dans l'enrobé devient négligeable (hautes températures et basses fréquences (Clard et Di Benedetto, 2003; Di Benedetto et coll., 2004). La variation du module statique (E_0) d'un mélange à un autre peut être expliquée par une légère hétérogénéité parmi les échantillons testés. Cette variation peut être également expliquée par une variation dans la granulométrie et la teneur en vides (Di Benedetto et coll., 2004).

Tableau 5.1

Paramètres déterminés pour les bitumes et enrobés

Material	δ	k	h	E_0 (MPa)	E_∞ (MPa)	β	$LOGT_0(10^\circ C)$
10/20 binder	2.2	0.19	0.52	0	2000	800	-2.608
50/70 binder	2.0	0.175	0.55	0	2000	320	-3.721
PMB3 binder	2.1	0.18	0.54	0.01 ²	2000	1000	-5.260
PMB4 binder	1.7	0.18	0.46	0.004 ²	2000	1500	-4.214
10/20 mix	2.2	0.19	0.52	400	41500	800	0.220
50/70 mix	2.0	0.175	0.55	250	45400	320	-1.414
PMB3 mix	2.1	0.18	0.54	250	44000	1000	-2.347
PMB4 mix	1.7	0.18	0.46	1050	43500	1500	-1.634

(Source : Olard et di Benedetto, 2003)

6. Détermination des paramètres 2S2P1D

La méthode pour déterminer les constantes (δ , k, h, E_∞ , E_0 , β , C1 et C2) du modèle "2S2P1D" consiste à minimiser la somme des distances entre points expérimentaux et l'introduction général du modèle à N points de pulsation ω_i (Olard et Di Benedetto, 2003). Cette minimisation est faite à la température de référence (T_0) en utilisant le solveur d'Excel :

$$\text{minimisation de } \sum_{i=1}^N \left([E_1^{exp}(\omega_i) - E_1^{model}(\omega_i)]^2 + [E_2^{exp}(\omega_i) - E_2^{model}(\omega_i)]^2 \right) \quad (6.1)$$

E_1^{exp} et E_2^{exp} : Partie réelle et imaginaire du module complexe expérimental (E^{exp}).

E_1^{model} et E_2^{model} : Partie réelle et imaginaire du module complexe donné par le modèle 2S2P1D (E^{model}).

7. Calage à effectuer pour la détermination des paramètres 2S2P1D

Afin de réaliser le calage, il faut changer les valeurs de chacun des paramètres (constantes) afin que la modélisation coïncide avec les résultats d'essai. La figure 7.1 illustre la répercussion de chacun des paramètres sur la modélisation.

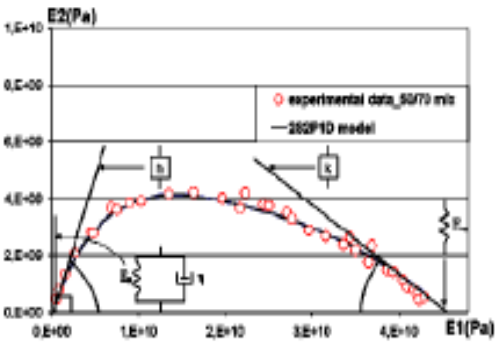


Figure 7.1 Fonction de chacun des paramètres (constantes)

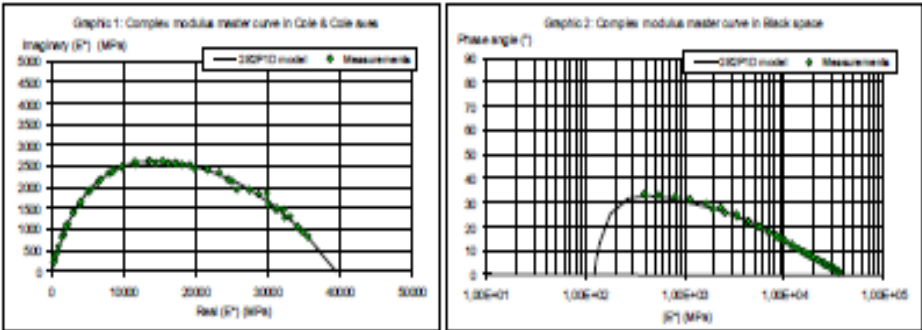
Pour effectuer le calage, vous devez suivre les étapes suivantes :

- 1) pour τ : Fixer une valeur arbitraire pour l'instant de 0 à 4 (ligne 23)

W (MPa)	Winf (MPa)	k	h	Delta	tau	tau0	Vp	Vm
125	39506	0.144	0.412	2.42	0.29	2000	0.5	0.2

- 2) Changer la valeur de chacun de ces paramètres (ligne 23) et vérifier que la modélisation cale les résultats d'essai présentés dans les graphiques suivants :

- E_0 : Graphics 1 et 2 (Plan Cole-Cole et Espace de Black)



- E_{inf} : Graphics 1 et 2 (Plan Cole-Cole et Espace de Black)

- k : Graphics 1 et 2 (Plan Cole-Cole et Espace de Black)

$\uparrow k = \uparrow$ Pente à partir de E_{inf}

- h : Graphics 1 et 2 (Plan Cole-Cole et Espace de Black)

$\uparrow h = \uparrow$ Pente à partir de E_0

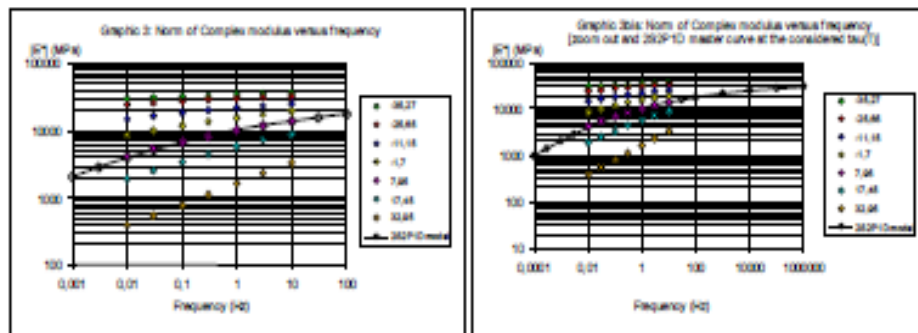
- Delta (δ) : Graphics 1 et 2 (Plan Cole-Cole et Espace de Black)

↑ Delta = ↓ Hauteur de la parabole

- Beta (β) : Graphic 2 (Espace de Black)

Varie de 0 à 2000 (se référer au tableau 5.1)

- 3) Faire varier la valeur de Tau (τ) (ligne 23) pour que les courbes aux "Graphics 3 et 3bis (Norm of Complex modulus versus frequency)" coïncident avec les résultats d'essai. À cet effet, les losanges sur la courbe du modèle encadreront les résultats d'essai (points). Il est préférable de commencer avec la température la plus froide : valeur de Tau (τ) très élevée, de l'ordre de 30 000 000. Pour les températures plus chaudes, la valeur de Tau (τ) va diminuer.

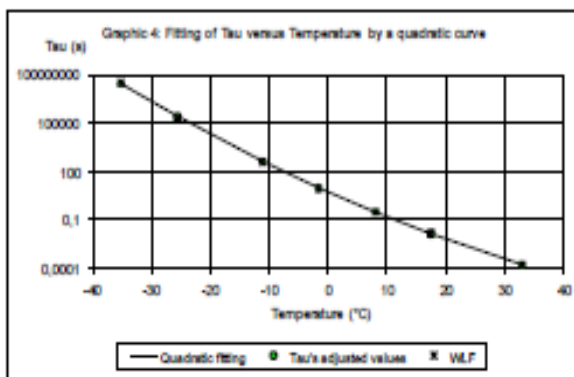


- 4) Lorsque Tau (τ) est déterminé pour une température d'essai, copier et coller cette valeur ("Collage spécial|Paste Special" et "Copier Valeurs|Paste Values") sous la température appropriée à la section "Tau's adjusted values" ou "Experimental t's adjusted values" (ligne 28).

Tau's adjusted values:

Temperature (°C)	-35,27	-25,65	-11,15	-1,7	7,95	17,45	32,95
Temperature °F	1243,9729	687,9225	124,3225	2,89	63,2025	304,5025	1085,7025
Tau	30000000	250000	410	8,3	0,29	0,014	0,00015
ln(Tau)	17,21670794	12,4292162	6,01615716	2,116255515	-1,237874356	-4,268697949	-8,804875264

- 5) Lorsque tous les Tau (τ) ont été déterminés, vérifier au "Graphic 4 (Fitting of Tau versus Temperature by a quadratic curve)" que les points verts coïncident le plus possible avec la courbe quadratique.



- 6) Les valeurs de A_0 , A_1 et A_2 se calculent automatiquement avec les valeurs des Tau (τ).

with $\tau(T) = e^{A_0 + A_1 T + A_2 T^2}$

	A_0	A_1	A_2
	1,58785198	-0,375582052	0,001883825

- 7) Retourner à la ligne 23, insérer à nouveau la valeur de Tau correspondant à la température de référence de l'ordre de 10°C ou tout près.
- 8) Vérifier que la courbe au "Graphic 2 (Espace de Black)" coïncident avec les résultats d'essai, si ce n'est pas le cas, faire varier la valeur de Beta (β).
- 9) Également, sur la ligne 36, indiquer les valeurs de Tau (τ) à la température de référence ($t(T_R)$) et la température de référence (T_R) de 10°C ou tout près.

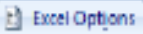

$\tau(T_R)$	T_R
0,29	7,95

8. Calcul de C1 et C2

Pour effectuer le calcul des constantes C_1 et C_2 , il faut utiliser le "solveur" :

Solveur - Système d'exploitation Windows Vista – Version anglaise

- Appuyer sur le bouton "Office"  (à gauche et en haut de l'écran)

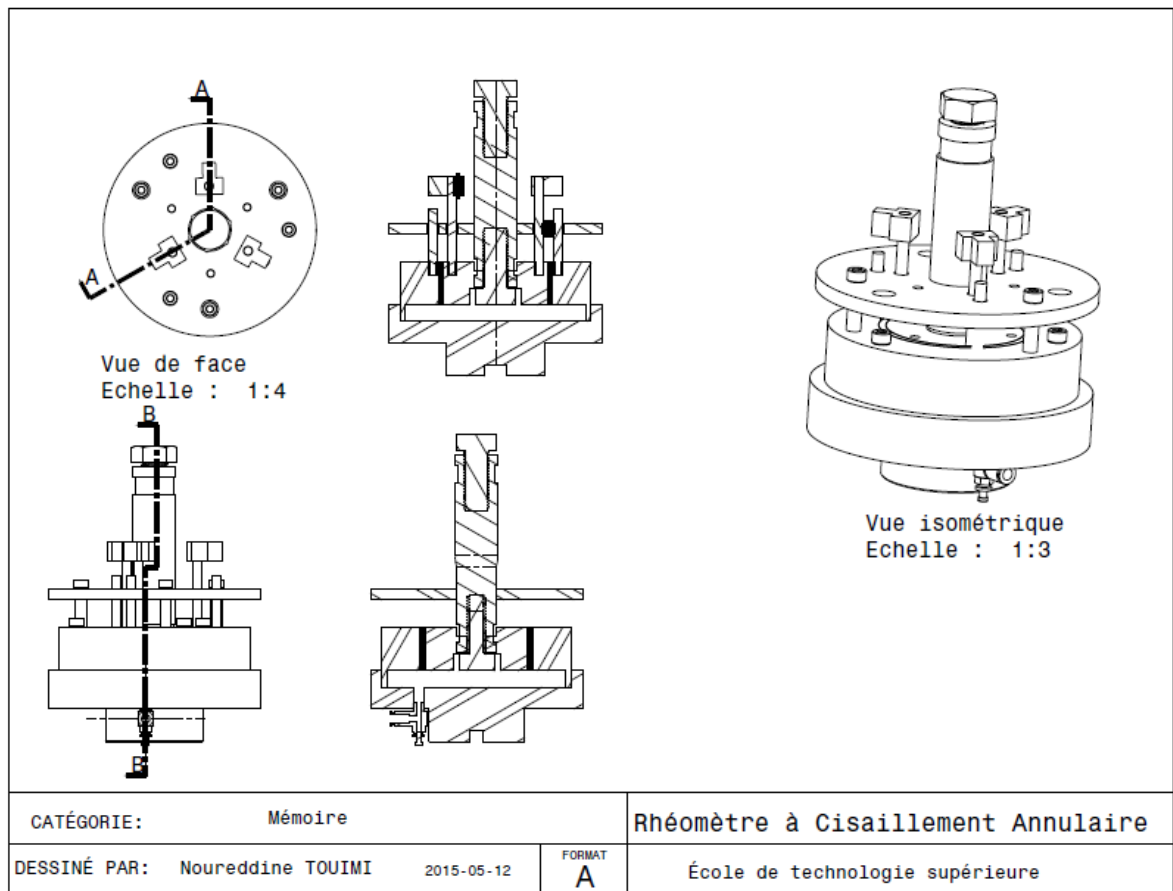
- Une boîte de dialogue apparaîtra : appuyer sur le bouton  (en bas et à droite de la boîte)
- Appuyer sur la touche "Add-Ins"
- Sélectionner l'option "Excel Add-ins" se trouvant en-bas de la boîte de dialogue à côté de "Manage"
- Appuyer sur "Go..." juste à droite
- Cocher l'option "Solver Add-In"
- Ensuite, sélectionner l'onglet "Data" 
- Complètement à droite, appuyer sur "? Solver" :
- Une boîte de dialogue intitulée "Solver Parameters" apparaîtra : appuyer sur "Solve"
- Une boîte de dialogue intitulée "Solver Result" apparaîtra : appuyer sur "Ok"
- Les valeurs de C_1 et C_2 sont maintenant déterminées.

Solveur – Pour la plupart des systèmes d'exploitation Windows - Version française

- Sélectionner dans la barre d'outils "Outils" et "Solveur ..."
- Une boîte de dialogue intitulée "Paramètres du solveur" apparaîtra : appuyer sur "Résoudre"
- Une boîte de dialogue intitulée "Résultats du solveur" apparaîtra : appuyer sur "Ok"
- Les valeurs de C_1 et C_2 sont maintenant déterminées.

ANNEXE VIII

COUPES DE LA CELLULE DE CISAILLEMENT ANNULAIRE



LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Anderson D. A. et Goetz W. H. 1973. « Mechanical Behavior and Reinforcement of Mineral Filler-Asphalt Mixtures ». *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists* Vol. 42, p 37 - 66.
- Arabani, M., S. M. Mirabdolazimi et B. Ferdowsi. 2012. « Modeling the fatigue behaviors of glasphalt mixtures ». *Scientia Iranica*. Vol. 19, no 3, p. 341-345.
< <http://dx.doi.org/10.1016/j.scient.2012.02.021> >.
- Bitume Québec. 2008. Guide de bonnes pratiques - La mise en œuvre des enrobés. En Ligne, 114p. <http://www.bitumequebec.ca/assets/application/publications/c74c97c89a90256_file.pdf>. Consulté le 8 Mai 2013.
- Boutin C., De La Roche C., Di Benedetto H. and Ramond G. 1995. « De la rhéologie du liant à celle de l'enrobé bitumineux, Théorie de l'homogénéisation et validation expérimentale ». Eurobitume Workshop 1995.
- Boussad N. et Des Croix P. 1997. « Definition of mix modulus and fatigue law from binder rheological properties ». *Mechanical Tests for Bituminous Materials*, RILEM 1997. pp 477-484.
- Carter, Alan et Perraton, Daniel. 2002. « La mesure du module complexe des enrobés bitumineux ». Deuxième conférence spécialisée en génie des matériaux de la société canadienne du génie civil, Montréal, 10 p.
- Chen J.-S. and Peng C.-H. 1998. « Analyses of Tensile Failure Properties of Asphalt-Mineral Filler Mastics ». *Journal of Materials in Civil Engineering (ASCE)* Vol. 10.256-262.
- Delorme J.-L. 2005. « Manuel LCPC d'aide à la formulation des enrobés à chaud ».
- Di Benedetto, Hervé, et Jean-François Corté. 2004. *Matériaux routiers bitumineux 1 : description et propriétés des constituants*, 1ère éd. Coll. « Mécanique et Ingénierie des Matériaux ». Paris: Hermes Science, 234 p.
- Di Benedetto, Hervé et De la Roche, C. 1998. « State of the Art on Stiffness Modulus and Fatigue of Bituminous Mixtures ». 180 p.
- Di Benedetto, Hervé .1998. « Écart entre état de connaissances et application ». Journée LAVOC, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 23 p.
- Di Benedetto H., De La Roche C., Baaj H., Pronk A. et Lundström R. 2004. « Fatigue of bituminous mixtures ». *Materials and Structures* Vol. 37. pp 202-216.

- Di Benedetto H. et Des Croix P. 1996. «Binder-mix rheology: limits of linear domain, non linear behaviour». Eurasphalt & Eurobitume Congress 1996.
- Dumont, A-G., Di Benedetto, Hervé. et Pucci, T, 2002. Réalisation des infrastructures de transport Tome II : « Les enrobés bitumineux ».
- Durand A., Morel J., Sutton O. et Muller G. 1997. « Investigations on bitumen/polymer/filler interactions and rheological properties of mastics » Mechanical Tests for Bituminous Materials, RILEM 1997. 173 - 178.
- Faure, Michel. 1998. Routes : Tome 2, 1ère éd. Coll. « Les Cours de l'ENTPE ».Lyon: Aléas, 255 p.
- Ferry, J.D. 1980.« Viscoelastic properties of polymers » John & Sons.
- Francken, L et Vanelstrate, A . 1995. « Relation between mix stiffness and binder complex modulus». The Rheology of Bituminous Binders. Eurobitume Workshop 1995.
- Francken , L. 1977. « Module complexe des mélanges bitumineux». Bull. Liaison Labo. P. et Ch. spécial V. 181 - 198.
- Heukelon W. et Klomp A. J. G. 1964. « Road desing and dynamic loading ».Association of Asphalt Pavement Technology Vol. 33. p 92.
- Huet, C. 1963. « Etude par une méthode d'impédance du comportement viscoélastique des matériaux hydrocarbonés ». Thèse de doctorat, Faculté des Sciences de l'Université de Paris , Paris, 69 p.
- Kandhal, Prithvi S. 1992. Waste Materials in Hot Mix Asphalt: An Overview. NCAT Report No. 92-6. Auburn University, Alabama: National Center for Asphalt Technology, 18 p.
- Lachance Tremblay, Éric. 2014. « Incorporation de particules de verre post consommation dans un enrobé bitumineux de Type ESG14 ». Mémoire de maitrise en génie de la construction, Montréal, École de Technologie Supérieure, 215p.
- Lachance Tremblay, Éric., Vaillancourt, Michel et Meunier, Mathieu. 2014. « Incorporation du verre de post consommation dans les chaussées en enrobé bitumineux (Avant-projet) ».Via BITUME. Vol. 9, N° 1, p14.
- Lachance Tremblay, Vaillancourt et Perraton. 2015. « Evaluation of the impact of recycled glas on asphalt mixture performances ». Road Materials and Pavement Design (RMPD).

- Lamothe, Sébastien. 2009. «Détermination des paramètres 2S2P1D avec les résultats d'essai du module complexe (E^*) ». Procédure d'utilisation du modèle 2S2P1D, Montréal, École de Technologie Supérieure de Montréal.
- Lamothe, Sébastien. 2014. «Endommagement d'un enrobé bitumineux partiellement saturé en eau ou en saumure soumis à des sollicitations cycliques de gel-dégel et mécaniques». Thèse de doctorat PHD, Montréal, École de Technologie Supérieure de Montréal, 414 p.
- LCPC. 1994. «Conception et Dimensionnement des structures de chaussée : Guide technique». Laboratoire Central des Ponts et Chaussées et Services d'Études techniques des Routes et Autoroutes. Ministère de l'équipement, des Transports et du Tourisme.
- Lesueur, D. 1996. « Propriétés mécaniques des liants routiers. Relations Structure-propriétés». Thèse de doctorat, Lyon, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 292 p.
- Lesueur , D. et Little (1999). « Effect of Hydrated Lime on Rheology, Fracture, and Aging of Bitumen».Transportation Research Record 1681. 93-105.
- Lesueur , D. (2002). « La rhéologie des Bitumes : Principes et Modifications.» Eurovia Management - Polo de Emulsiones Probisa - Pol. Ind. "Las Arenas" - c/ Ronda, 9 - 28320 Pinto (Madrid).
- Lelièvre, André. 1994. « Les enrobés bitumineux ». Première édition et mise à jour, 410 p.
- Lelièvre, André. 2002. « Les enrobés bitumineux ». mise à jour, 410 p.
- Malo, Jean-Michel. 2013. « Incorporation des particules de bardeaux d'asphalte de postconsommation dans les enrobés bitumineux». Mémoire de maîtrise, Montréal, École de Technologie Supérieure de Montréal, 356 p.
- Marasteanu , M. 1999. «Inter-conversions of the linear viscoelastic functions used for the rheological characterization of asphalt binders ». Pennsylvania State University. Department of Civil and Environmental Engineering. 165 p.
- Ministère des Transports du Québec. 2012. « Orientation ministérielle sur le choix des types de chaussées 2010-2015 ». En Ligne, 34 p.
<http://www.mtq.gouv.qc.ca/portal/page/portal/entreprises/zone_fournisseurs/reseau_routier/chaussee/orientation_ministerielle_choix_types_chaussees>.
Consulté le 9 Mai 2013.

- Ministère des Transports du Québec. À jour au 30 Janvier 2013. Tome II - Construction Routière. En Ligne. Québec (QC): Publications Québec.
<http://www3.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/produits/ouvrage_routier/normes/norme7.fr.html>. Consulté le 2 Mars 2013.
- MTQ.2010. «Les chaussées et le climat québécois ».
<http://www.mtq.gouv.qc.ca/portal/page/portal/entreprises/zone_fournisseurs/reseau_routier/chaussee/chaussees_climat_quebecois>.
- Olard , F. et Di Benedetto , H. 2003. « General "2S2P1D" model and relation between the linear viscoelastic behaviors of bituminous binders and mixes ». International Journal of Road Materials and Pavement Design Vol. 4 (Issue 2).
- Olard, François. 2003. « Comportement thermomécanique des enrobés bitumineux à basses températures. Relations entre les propriétés du liant et de l'enrobé ». Thèse de doctorat, Lyon , Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 221 p.
- Perraton, Daniel. 2012a. MGC 805 - Science des Matériaux, Programme de Maîtrise en génie de la construction, Montréal, École de Technologie Supérieure, pagination multiple p.
- Perraton, Daniel. 2012b. CTN 404 – Science et technologie des Matériaux, Programme de Baccalauréat en génie de la construction, Montréal, École de Technologie Supérieure, pagination multiple p.
- Perraton, Daniel. 2009. « Faire la rue ». Le journal de l'École de technologie supérieure : l'ÉTS @ 360°.vol 5 No 1, p5.
- Rigden P. J. 1947. « The use of filler in bituminous road surfacing. A study of filler-binder systems in relation to filler characteristic ».Journal of chemistry and industry, Vol. 66.p 299.
- Sainton, A. Puiatti, D et Walter, D. 1999.«Modification du bitumen et des enrobes bitumineux par ajout de chaux hydratée ». Revue générale des routes et aéroports, N°770.
- Sayegh G. 1965. «Variation des modules de quelques bitumes purs et enrobés bitumineux».Thèse de doctorat, Faculté des Sciences de l'Université de Paris. Paris.
- Soenen H. et Teugels W. (1999). « Rheological investigation on binder-filler interactions » Eurobitume Workshop 1999 Paper No. 102.

- Ugé, P., Gest, G. Gravois, A. 1977. « Nouvelle méthode de calcul du module complexe des mélanges bitumineux ». Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, N° spécial V, p199-213.
- Van Rompu, J et Di Benedetto. (2006). « Étude du comportement mécanique des mastics bitumineux à l'aide d'un rhéomètre à cisaillement annulaire ». mémoire de master recherche, Lyon, ENTPE Lyon. 171 p.
- Watson, Tom. 1988. « When the tire hits the glasphalt ». Resource Recycling. En Ligne. no July 1988, p. 18-21. < <http://infohouse.p2ric.org/ref/02/01286.pdf> >. Consulté le 11 Janvier 2013
- Zeng M., Bahia H. U., Anderson M. R. and Turner P. 2001. « Rheological modeling of modified asphalt binders and mixtures ». Annual Meeting of the Association of Asphalt paving Technologists.